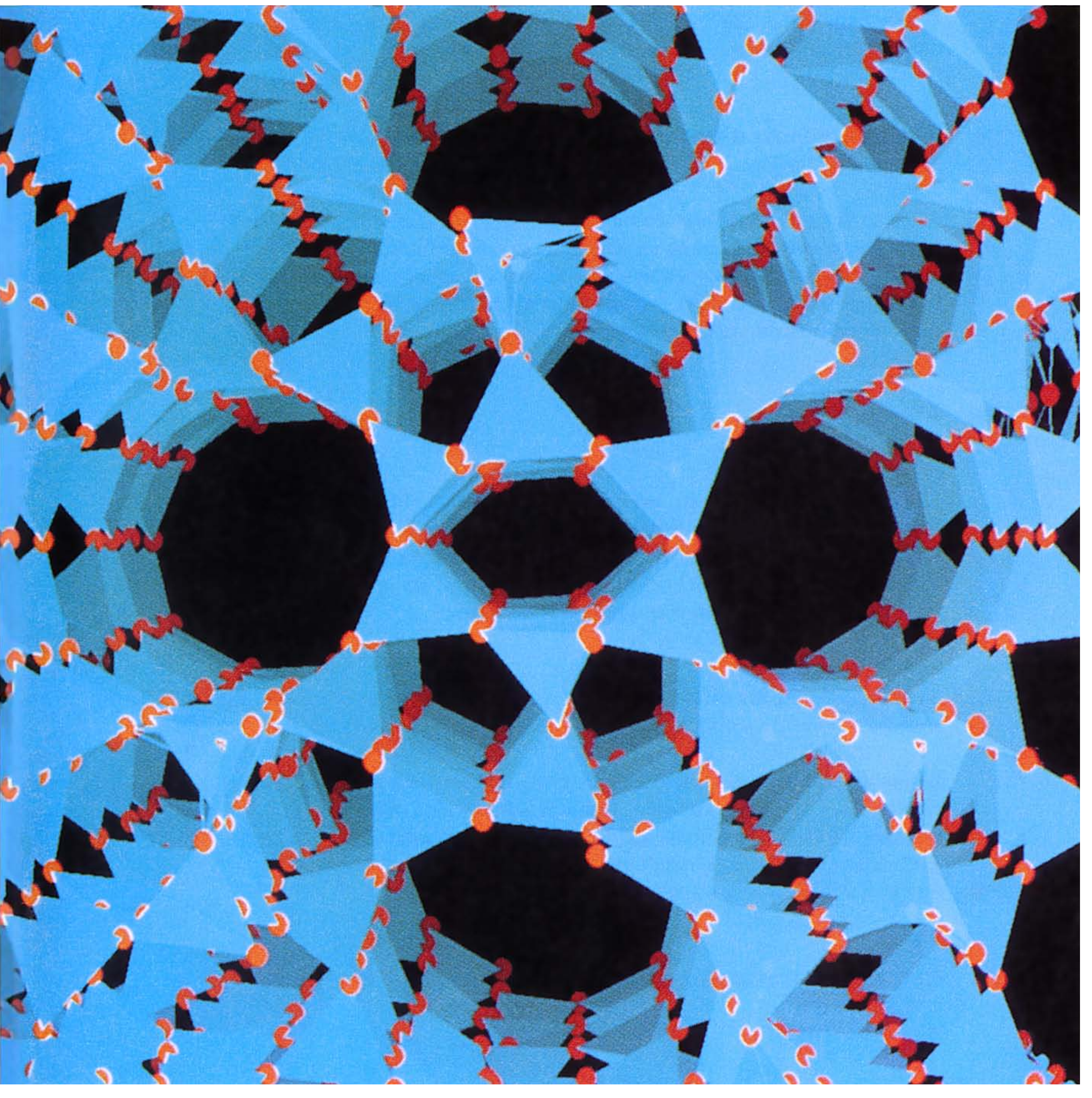
INVESTIGACION Y CIENCIA

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN



CRISTALES DE ZEOLITA POROSA

Septiembre 1989

500 PTAS.

INVESTIGACION Y
CIENCIA

Septiembre de 1989 Número 156

Edición española de **SCIENTIFIC AMERICAN**

SECCIONES

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

Emilio Martínez Hermida: *Almacenamiento de memoria y sistemas neurales*; Amando García: *Vidrios de espines*; Juan Carlos Carracedo y P. Agnew: *Vulcanismo en los rifts*; Cristóbal Mezquita: *El tracto gastrointestinal durante el crecimiento y la reproducción*; Manuel Puigcerver: *Colorística espacial*; Antonio Blanco Freijeiro: *El pensamiento visual en la edad de Hielo*; Elías Molins: *Zeolitas sintéticas*; Luis Bou: *Juegos de ordenador*; J. Vilardell: *Taller y laboratorio.*

Ciencia y sociedad:

Josep-Enric Llebot

Ciencia y empresa:

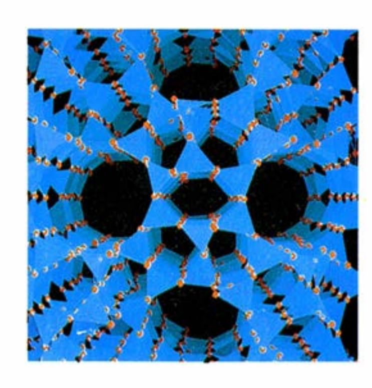
Manuel Puigcerver

Libros:

Luis Alonso y Antonio Prevosti

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Página	Fuente
7-13	Nicolás García Tapia y Magda Mària
15	James L. Olds, Instituto Nacional de Trastornos Neurológicos y Comunicación y Apoplejía
16-22	Thomas C. Moore
25	Quesada/Burke
26-30	Hank Iken
38	Keith G. Cox, Universidad de Oxford
40-46	George Retseck
49	Museo Nacional de Arte, Suecia
50-53	Patricia J. Wynne
57	Artur A. Tishchenko
58-62	George V. Kelvin
64-65	Instituto de Prehistoria, Universidad de Tubinga
66	Museo de Historia Natural, Chicago; fotografías de Randall White
67	Real Instituto de Ciencias Naturales, Bruselas; fotografías de Randall White
68	Instituto de Prehistoria, Universidad de Tubinga (*arriba*), Museo Nacional de Prehistoria, Les Eyzies-de-Tayac (*abajo*)
69	Museo de Antigüedades Nacionales, Saint-Germain-en-Laye, Museo Logan de Antropología, Beloit College y Museo de Antigüedades Nacionales. (Fotografías de Randall White)
70	Museo Logan de Antropología; fotografía de Randall White
71	Museo de Historia Natural; fotografías de S. Varnedoe
73	Chemical Design Ltd.
74-76	Gabor Kiss
77	Mark E. Davis, Instituto Politécnico y Universidad estatal de Virginia
80-84	Michael Goodman
87-90	Clifford A. Pickover, centro de investigación Thomas J. Watson de IBM



LA IMAGEN DE LA PORTADA es un modelo del cristal de la zeolita catalítica ZSM-5 [véase "Zeolitas sintéticas", por George T. Kerr, en este número]. Reviste especial importancia en la industria del refinado de petróleo. Las formas azules son tetraedros; en su centro se sitúan átomos de aluminio o de silicio y, en los vértices, átomos de oxígeno (*esferas rojas*). Los átomos de oxígeno se han dibujado desproporcionadamente pequeños. La imagen se ha creado con el programa Chem-X, desarrollado y distribuido por Chemical Design de Oxford.

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL Francisco Gracia Guillén
DIRECTOR EDITORIAL José María Valderas Gallardo
REDACCIÓN Purificación Mayoral Martínez
PRODUCCIÓN César Redondo Zayas
PROMOCIÓN EXTERIOR Pedro Clotas Cierco
EDITA Prensa Científica, S. A. Calabria, 235-239 - 08029 Barcelona (ESPAÑA)
Teléfono 322 05 51 Telefax 410 79 12

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR Jonathan Piel
BOARD OF EDITORS Armand Schwab, Jr., Managing Editor; Timothy Appenzeller, Associate Editor; Timothy M. Beardsley; John M. Benditt; Laurie Burnham; Elizabeth Corcoran; Ari W. Epstein; Gregory R. Greenwell; John Horgan; June Kinoshita; Philip Morrison, Book Editor; Tony Rothman; Ricki L. Rusting; Russell Ruthen, Karen Wright
PUBLISHER Harry Myers
ADVERTISING DIRECTOR Peter B. Kennedy
PRESIDENT AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER Claus-Gerhard Firchow
CHAIRMAN OF THE BOARD Georg-Dieter von Holtzbrinck
CHAIRMAN EMERITUS Gerard Piel

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Calabria, 235-239
08029 Barcelona (España)
Teléfono 322 05 51 ext. 33-37

Precios de suscripción, en pesetas:

	Un año	Dos años
España	5500	10.000
Extranjero	6200	11.500

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 500 pesetas
Extraordinario: 650 pesetas

- Todos los precios indicados incluyen el IVA, cuando es aplicable.
- En Canarias, Ceuta y Melilla los precios incluyen el transporte aéreo.
- El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

DISTRIBUCION

para España:

MIDESA
Carretera de Irún, km. 13,350
(Variante de Fuencarral)
28049 Madrid Tel.652 42 00

para los restantes países:

Editorial Labor, S. A.
Calabria, 235-239 - 08029 Barcelona
Teléfono 322 05 51

PUBLICIDAD

Madrid: Gustavo Martínez Ovín
Menorca, 8, bajo, centro, izquierda.
28009 Madrid
Teléfonos 409 70 45 - 409 70 46

Cataluña:
Thaïs Muñoz Oliva
Muntaner, 467-469, 3º 3ª
08021 Barcelona
Teléfono 211 92 45



ISSN 0210-136X Dep. legal: B. 38.999-76

Fotocomposición: Tecfa. Línea Fotocomposición, S. A. Almogàvers, 189 - 08018 Barcelona

Fotocromos reproducidos por Tecfa, S.A. Almogàvers, 189 - 08018 Barcelona

Imprime Rotographik, S.A. Ctra. de Caldes, km 3,7 - Santa Perpètua de la Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

Los espacios en gris
corresponden a publicidad
en la edición impresa

Hace...

José M.ª López Piñero

...cuatrocientos años

Murió Pere Roget, "ullerer" de Barcelona y uno de los primeros constructores de anteojos astronómicos en Europa.

Como es sabido, fue Galileo quien convirtió el anteojo en arma de la nueva astronomía. La invención de este instrumento fue realizada con anterioridad, de modo independiente, en varios lugares de la Europa occidental. Constituye uno de los casos de "descubrimiento múltiple" que, desde los trabajos de Merton, sabemos que es un proceso normal en el desarrollo de la ciencia, pero que tradicionalmente había sido el motivo de disputas de prioridad nacionalistas o de escuela.

Uno de los escenarios de la invención del anteojo fue la Cataluña de finales del siglo XVI. Desde hacía tiempo se sabía que entre sus primeros constructores figuraban unos artesanos catalanes apellidados Roget, a los que se refiere Girolamo Sirturo, un seguidor de Galileo, en su libro *Telescopium, sive Ars perficiendi novum illud Galilaei visorium instrumentum ad sydera* (1618). Picatoste reprodujo ya los principales fragmentos de dicha obra relativos a esta cuestión: "Tomé el camino de España –afirma Sirturo–; al llegar a Gerona [...] se acercó a mí cierto arquitecto curioso, rogándome le permitiese ver mi telescopio. Yo, disgustado de la importunidad de aquel hombre, empecé a negarme y él a insistir, sin separarse de mi lado, de suerte que me hizo sospechar si estaría dedicado también al arte. Esta sospecha no me engañó, porque aquel hombre, después de haber observado hasta la saciedad un árbol distante, me volvió a rogar que le permitiera examinar, sacar y manejar las lentes, seguro de que, aun cuando quisiera imitar el instrumento, su edad avanzada no correspondía ya a las fuerzas de su ánimo. Después que hubo manejado y considerado con mucha atención los cristales, me llevó a su casa y, cerrado el cuarto con llave, me enseñó la armadura o los hierros de un telescopio, tomados de orín. Este hombre había sido en otro tiempo constructor de anteojos y allí estaba latente todo el telescopio. Juzgándome conducido hasta él por el favor del genio del arte, hice amistad con él y más libremente pude penetrar aquel secreto. Después me enseñó las formas del telescopio delineadas en un libro, y a mi ruego permitió que anotase las proporciones íntegras y, luego, examinadas y aumentadas por diarios experimentos, darles perfección y redactar la tabla que presento al lector. Nuestro arquitecto, según después supe, era hermano de Roget de Borgoña, habitante un tiempo en Barcelona, hombre de grande industria, y el primero que en España estableció el arte. Este tuvo tres hijos, de los cuales uno, dedicado a las letras y a la religión, tomó el hábito de Santo Domingo y, siendo fraile, trazó telescopios. Nadie los ha trazado más exactos que estos hermanos Roget".

Sirturo compara los anteojos de los Roget con los construidos en Italia, Holanda y otros lugares de Europa y cita en varias ocasiones las normas seguidas por los fabricantes españoles de lentes. Esta era toda la información existente sobre el tema hasta las decisivas aportaciones documentales que J. M. Simón-Guilleuma publicó en 1960. Gracias a su trabajo conocemos que el oficio de fabricante de lentes tenía una larga tradición en varias ciudades españolas. Desde finales del siglo XIV se había establecido en Barcelona y ya a comienzos de la centuria siguiente había conducido a un comercio

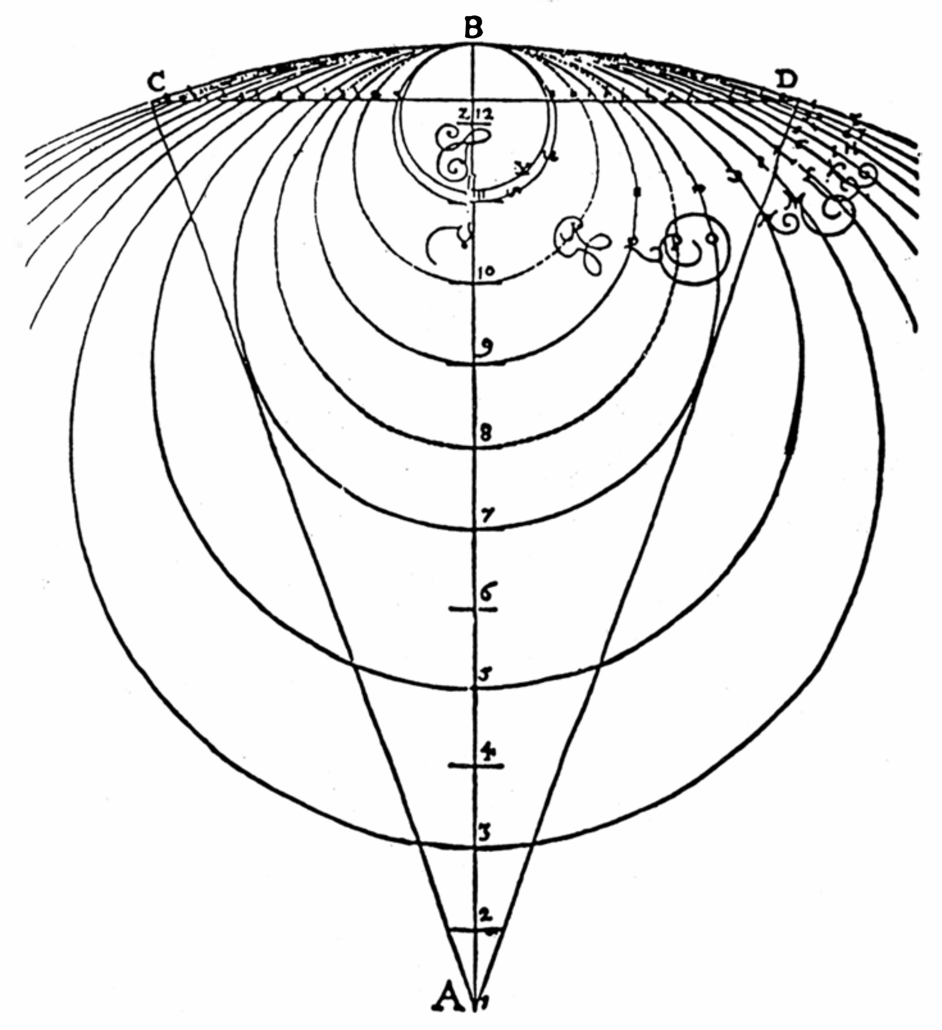


Tabla de la obra Telescopium *(1618), de Girolamo Sirturo, primera monografía sobre el anteojo astronómico. El construido por los hermanos Roget que vio este autor constaba de una lente convexa de esfericidad CDB y de otra cóncava de esfericidad correspondiente al círculo centrado en la división 12*

de exportación hasta la parte oriental del Mediterráneo. Lo mismo que los fabricantes de otros países, los *ullerers* barceloneses labraron durante mucho tiempo únicamente cristales convexos destinados a corregir la presbicia y sólo a finales del siglo xv o comienzos de la centuria siguiente iniciaron la fabricación de cóncavos.

En este contexto, sólidamente basado en datos de archivo, Simón-Guilleuma aportó las pruebas documentales de que, antes de 1593, en esos talleres barceloneses se habían construido "anteojos de larga vista". En marzo de dicho año falleció Pedro de Cardona, destacada personalidad de la oligarquía ciudadana, que dejó entre sus bienes una "ullera llarga guarnida de llautó", cuidadosamente descrita por el escribano, que resalta su parte óptica y su montura alargada de unos veinte centímetros. Dicho instrumento, que seguramente fue una ofrenda del artífice constructor, pasó a ser posesión de su viuda y más tarde de su hijo. Pocos años después, aparecen pruebas de que otros semejantes estaban en poder de varios acomodados mercaderes de Barcelona. Jaume Galvany tenía una "ullera de llarga vista" que se vendió en pública subasta, tras su muerte (1608), por cinco sueldos. Honorato Graner, fallecido en 1613, poseía asimismo una "ullera de llauna per mirar de lluny". Recordemos que la patente de invención del anteojo se presentó ante el Consejo de Estado de los Países Bajos en 1608 y que tres años más tarde Johannes Janssen declaró que su padre había construido el primer instrumento de este tipo en Holanda, según el modelo de otro italiano fechado en los años noventa. La primera referencia impresa parece ser una descripción deliberadamente oscura de Giambattista della Porta (1589) de la combinación de lentes cóncavas y convexas.

Simón-Guilleuma ha reconstruido también documentalmente la familia de Roget. Sirturo se entrevistó en Gerona con Joan Roget, que moriría poco después muy anciano. Su hermano Pere Roget, al que alude también Sirturo, fue un importante *ullerer* que murió en 1589 en Barcelona. Los hijos de este último, Joan, Magín y Miquel –que era dominico– son los que merecieron la expresión de que "nadie ha trazado telescopios más exactos que estos hermanos Roget". Conviene subrayar que, tanto en Cataluña como en el resto de Europa, el anteojo fue un objeto de mera curiosidad hasta que Galileo, como hemos dicho, lo transformó en el instrumento que revolucionaría la observación astronómica.

Inventores españoles en el Siglo de Oro

Los siglos XVI *y* XVII *fueron para España los del dominio de la política y del arte. Pero fueron también los del poder de la técnica y de la invención de una forma, aunque efímera, brillante*

Nicolás García Tapia

Desde finales de la Edad Media, los monarcas de los diferentes reinos cristianos españoles venían concediendo "cédulas de privilegio", consistentes en documentos que garantizaban unos determinados derechos para la explotación de tierras, bosques o molinos a ciertos particulares. Algunas cédulas reales se referían a nuevos procedimientos técnicos o a máquinas de nuevo tipo cuyo inventor deseaba ser protegido de las posibles imitaciones de sus competidores.

Muy pronto, a semejanza de ciertas repúblicas italianas –como la de Florencia en 1421 y la de Venecia en 1474–, la protección de los inventores fue tomando forma jurídica en España. Puede decirse que ya en la época de Carlos V se había consolidado el sistema de patentes, conservándose muchas de ellas en el Archivo General de Simancas. Del 18 de agosto de 1522 puede considerarse la primera patente de invención dada en España, ya que el documento reúne todas las características que lo identifican todavía en la actualidad. Se trata de una cédula de privilegio concedida en exclusiva de por vida a un inventor, el catalán Guillén Cabier, para que pueda construir un aparato con el que un navío consiga avanzar en alta mar, sin necesidad de velas ni remos. No parece que tuviera el éxito esperado, pues no hay constancia de otros ensayos posteriores.

Esto nos lleva a considerar una de las más importantes obsesiones de los inventores que trabajaron en el siglo XVI para hacer más maniobrables los barcos de la armada española. En 1531, el griego Jano Lascari propuso, al embajador español de Carlos V en Roma, un "ingenio para navegar en tiempo de calma". El embajador creía que este invento era cosa difícil, pero añadía que "más cosas son posibles en el mundo y en especial a los griegos, que siempre fueron inventores de grandes cosas y novedades".

El embajador español se refería sin duda a los inventores de la Grecia clásica, y el barco posiblemente estaría impulsado por ruedas de paletas. Un antiguo grabado, basado en la obra *De rebus milicis* (370 d.C.), representa una de estas embarcaciones con ruedas impulsadas por bueyes, que ilustra lo que se hacía en la antigüedad clásica.

El primer barco movido por ruedas del que se tiene constancia que llegó a avanzar en el mar fue el del español Blasco de Garay. La primera experiencia se hizo en Málaga el 4 de octubre de 1539, en una nao propulsada por seis ruedas de paletas movidas por 18 hombres aferrados a grandes manivelas. El barco consiguió avanzar a una velocidad de una legua por hora; Garay perfeccionó su invención en sucesivos ensayos, pero su alto costo y el estorbo que las ruedas hacían a la artillería fueron las causas de que no se adoptasen por la armada española. Blasco de Garay pasó a la posteridad por esta invención, ya que estuvo considerado erróneamente como el precursor de los barcos de vapor; incluso el invento fue recogido por Balzac en su comedia *Les ressources de Quinola*. Garay fue un gran inventor, no sólo por su barco de ruedas, sino por sus otras aplicaciones a la marina consistentes en sistemas para extraer los barcos hundidos, sus equipos de buceo y de iluminación bajo el agua, así como otros numerosos instrumentos para convertir en potable el agua del mar y hacer molinos portátiles para sustentar toda una armada.

La ilusión de conseguir la navegación con ruedas de paletas no acabó con Blasco de Garay. Un hijo suyo del mismo nombre siguió intentándolo y la serie de inventores que ofrecieron construir para España artefactos similares sería interminable. Como curiosidad señalemos al medinense Juan de Bracamonte, quien en 1588 ofrecía una "máquina de guerra dispuesta por vía de ingenio, sin que para moverse tenga necesidad de viento... no pudiendo ser hundida por fuego de cañones ni incendiada, resistiendo las más grandes tormentas". Tan fabulosa embarcación de guerra fracasó, como otros que intentaron ingenios similares; incluso entre ellos hubo algunos clérigos como fray Diego de Floriana, de la Orden de Predicadores, y el padre jesuita Martín Rico, quien, como dicen los documentos, "murió de pena" al ver fracasar sus intentos de hacer viable un barco con ruedas de paletas. Estos inventos náuticos naufragaron con el fracaso de la Armada Invencible en 1588. Sin embargo, no hay que olvidar que, a lo largo del siglo XVI, España había realizado extraordinarios avances en el campo de la navegación, siendo su máximo representante don Alvaro de Bazán quien, el 25 de enero de 1550, había depositado una patente con sus invenciones en las galeras y los galeones. La importancia de este avance náutico es reconocida universalmente.

No podemos dejar de citar al ingeniero de origen italiano Juanelo Turriano (hacia 1500-1585), quien se hizo fa-

NICOLAS GARCIA TAPIA es catedrático en la Escuela Universitaria Politécnica de Valladolid. Tras una primera formación técnica –perito industrial mecánico e ingeniero hidráulico por la Escuela Nacional Superior de Grenoble– se licenció en historia del arte con premio nacional y se doctoró con premio extraordinario. Ha publicado los siguientes libros: *Molinos tradicionales, Ingenios y máquinas, Vida y técnica en el Renacimiento, Mecánica de fluidos y Máquinas hidráulicas, El Canal de Castilla e Ingeniería y Arquitectura en el Renacimiento español.*

moso por los relojes y autómatas que construyó para Carlos V. Su máquina más admirada fue la que hizo para elevar el agua desde el Tajo al Alcázar de Toledo, consistente en una serie de torretas compuestas por cazos que se balanceaban en unos largos ejes, pasándose el agua de uno a otro hasta completar una distancia de más de 300 metros y salvando un desnivel de unos 100 metros. Todo ello se movía ingeniosamente por unas grandes ruedas hidráulicas situadas en el río Tajo. El aspecto de estas máquinas era el de unos extraños seres humanos que movían rítmicamente sus pies y sus brazos, recogiendo con ellos el agua y depositándola a mayor altura. En el siglo XVII, un entremés titulado *El mago* y representado ante Felipe IV, imitaba el baile del "artificio de Juanelo" (como entonces se le conocía) con actores que se balanceaban provistos de sendos cazos de agua que se pasaban de unos a otros al ritmo de la música, hasta acabar todos mojados. Posiblemente este aspecto humano de una máquina de madera fue lo que dio origen a la leyenda del "Hombre de Palo" que circuló por Toledo. Juanelo murió pobre, pero su fama traspasó las fronteras y llegó a ser considerado casi como un ser mítico.

La popularidad de Juanelo contribuyó a que se considerase suyo, hasta hace bien poco, un manuscrito titulado *Los veintiún libros de los ingenios y de las máquinas*. Los documentos demuestran que el verdadero autor fue el aragonés Pedro Juan de Lastanosa (hacia 1500-1576), maquinario de Felipe II.

Este importante texto de ingeniería y maquinaria hidráulica, escrito entre 1564 y 1575, contiene las invenciones más representativas en este campo de la técnica. Aunque se nota una cierta influencia flamenca y sobre todo italiana, la tecnología descrita es propiamente española. Algunas de las innovaciones que allí se contienen se deben, como era de esperar, al propio Lastanosa; por ejemplo, el sistema de triangulación con el cuadrante geométrico, introducido en España por Lastanosa junto con Pedro de Esquivel para la ejecución del mapa de España, tarea que les encargó Felipe II y que no llegaron a completar. También se describe en el manuscrito, aunque intencionadamente incompleto, un curioso molino que funciona con pesas, cuya patente se conserva en el Archivo de Simancas, como una prueba más de que fue Lastanosa quien escribió el manuscrito y al que corresponde el mérito de haber recopilado e ideado, con gran altura científica y erudita, un texto representativo del alto nivel alcanzado por la ciencia y la técnica española del Renacimiento.

Un extenso capítulo de *Los veintiún libros*... está dedicado a los molinos, que eran en el siglo XVI el equivalente a nuestras modernas fábricas. La técnica del molino no consistía solamente en la molturación de grano, sino que las aplicaciones del mismo abarcaban los más diversos procesos industriales: abatanado de paños, fabricación de papel y de pólvora, molienda de coloran-



LIBRO PRIMERO de las calidades de las aguas y de sus propriedades y de su generacion ó nascimientos

AVIENDO determinado de investigar las cosas de la naturaleza, las quales ay dentro de la tierra, y el modo como se engendran conviniente cosa sera considerar primero su nascimiento y causas, porque las cosas que naturaleza engendra dentro de las entrañas ó en el regazo de la tierra ó en sus concavidades o cavernas: las quales cosas ay parte dellas, las quales se nos manifiestan ... y hazen ... encima de la misma tierra, como es el humor, la exalacion, el ayre, y el fuego, y parte destas cosas se cavan con industria y fuerza de brazos de dentro de la tierra; como es algun metal ó tierra q tenga en si alguna particular virtud, como es algun jugo congelado o alguna piedra ... de natura, como son aquellas cosas que llamamos mistos; convendra q para esto tratemos primero de la generacion, y de las causas ... de la primera materia, ... los quales se van allegando a la naturaleza de los elementos: ... son muy cercanas ó propinquas a ellos; de modo q de la tierra se engendran las cosas q son de una tercera especie, y queriendo empezar, de la primera ...: la qual es el humor, hallase en el que se comprehenden dos cosas ó dos naturalezas que es la agua y el jugo, y porque la agua es una cosa subtil; la qual es casi como cosa simple, sin

A.

1. PAGINA INICIAL DEL MANUSCRITO conocido como *Los veintiún libros de los ingenios y de las máquinas* (1564-1575), conservado en la Biblioteca Nacional de Madrid. Atribuido hasta hace poco a Juanelo Turriano a causa de las falsas portadas que se añadieron en el siglo XVII, se ha demostrado documentalmente ser obra del aragonés Pedro Juan de Lastanosa. Contiene una detallada recopilación de obras de ingeniería y técnica hidráulica, con una base científica experimental, según la línea que Lastanosa expone desde el principio: "investigar las cosas de la naturaleza". Algunas de las invenciones presentadas en el manuscrito habían sido patentadas por el propio Lastanosa, lo que constituye una prueba más de su autoría del mismo.

tes, extracción del agua, etcétera. Además representaba el aprovechamiento idóneo de las energías entonces disponibles: el agua y el viento. No es de extrañar que numerosos inventores dedicaran sus esfuerzos al perfeccionamiento de las ruedas hidráulicas, como testifican las patentes que en España se dedicaban a ello. En *Los veintiún libros*... aparece tratado el problema hidráulico de los molinos, por primera vez desde un punto de vista científico; la descripción del fenómeno llamado "de regolfo" en una rueda hidráulica horizontal (*rodezno* o *rodete*) a la que se rodea de un cilindro (*cubeta*), demuestra que se estaba en el inicio de lo que se llamaría en el siglo XIX la *turbina hidráulica*, invención de gran trascendencia en la historia de la técnica.

2. RECONSTRUCCION DEL INGENIO DE JUANELO TURRIANO, basada en documentos, mostrando una de las torrecillas para elevar el agua desde el río Tajo al Alcázar de Toledo, en la segunda mitad del siglo XVI. El agua era ascendida por medio de unos brazos oscilantes terminados en un cazo por un extremo y en un tubo acodado por el otro; cuando la estructura se inclinaba a uno de los lados, los tubos depositaban cierta cantidad de agua en los cazos del siguiente brazo; la operación se repetía en todas las oscilaciones hasta llegar el agua a los depósitos altos de la torreta. El mecanismo se asemejaba a un autómata de madera o un "hombre de palo" y causó una extraordinaria admiración en la época, suscitando toda una serie de leyendas.

El reciente descubrimiento de un nuevo manuscrito sobre tecnología, del medinense Francisco Lobato (escrito hacia 1576), ha servido para corroborar aún más el avance técnico que había experimentado España en la segunda mitad del siglo XVI. La información proporcionada por Lobato, aunque se trate de un hombre mucho menos culto que Lastanosa, es de gran importancia, ya que por primera vez se relatan los ensayos, los éxitos y los fracasos de un inventor que trabaja con sus manos. Lobato intentó el sueño imposible de conseguir el movimiento continuo; pero, al hacerlo, creó máquinas que aprovechaban al máximo la energía. De esta forma, perfeccionó el molino "de regolfo" haciendo el rodete metálico y dando a sus álabes una forma hidrodinámica curvada hacia atrás, aproximando su forma a las actuales turbinas de reacción.

Entre las invenciones en las que intervino Francisco Lobato está un curioso molino que obtenía su energía hidráulica a través de un sifón que aspiraba el agua de un embalse o de un simple depósito de agua. En esta máquina trabajó bajo las indicaciones del famoso médico, escritor y filósofo medinense Gómez Pereira, que pensaba emplearla para eliminar así las presas de molino que impedían la navegación fluvial. Lobato relata en su manuscrito las vicisitudes de las pruebas de la máquina, realizadas en una finca cercana a Medina del Campo. Finalmente, Gómez Pereira consiguió patentar el molino de sifón el 30 de junio de 1563, obteniendo una concesión de explotación por diez años.

Los molinos hidráulicos fueron los predominantes en el paisaje español y raro era el pueblo que no tenía más de un molino, aunque fuese aprovechando un modesto arroyo. Sin embargo, no estaban ausentes los molinos de viento, protagonistas del famoso pasaje del Quijote, cuyos perfiles, con la torre cilíndrica, la caperuza cónica orientable y sus largas aspas, son sobradamente conocidos en el paisaje manchego. No eran exclusivos de la Mancha, ya que los había en casi todas las regiones de España, en Galicia, Aragón y en la Castilla del norte, donde recientemente hemos identificado sus ruinas en Tierra de Campos. Es lógico que tan compleja máquina como era el molino de viento atrajese el deseo de los inventores de perfeccionarla.

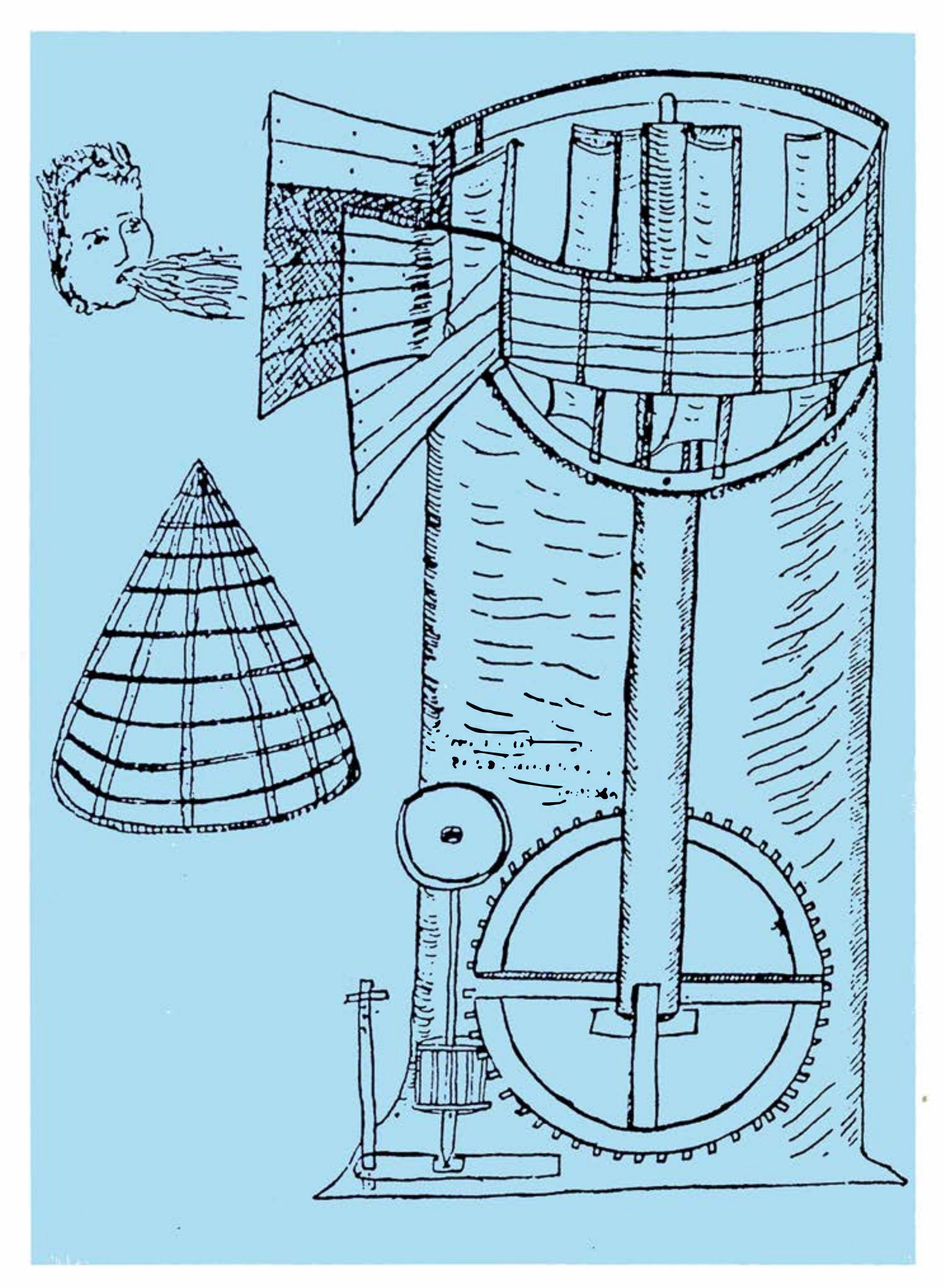
Francisco Lobato dibuja y describe varios molinos de viento en su manuscrito y sólo uno, para desecar lagunas, procede de su fantasía de inventor.

De los tradicionales molinos manchegos, indica que son de procedencia flamenca o alemana y dibuja un original molino del que sin embargo no dice de dónde viene: se trata de un curioso molino de eje vertical, con aspas en forma de turbina, tan minuciosamente descrito que parece como si Lobato lo tuviese cerca al escribir sobre él. Aunque este molino de eje vertical aparece en fecha posterior en otros tratados de máquinas escritos en Francia y en Italia, la insistencia de las numerosas patentes españolas que inciden sobre tipos de molinos de eje vertical con aspas horizontales, hacen prever su existencia en España en los siglos XVI y XVII, aunque no queden restos materiales.

No fueron éstos los únicos inventos que se patentaron en España en la época. Ante la corte desfilaron un sinnúmero de inventores con sus máquinas más o menos prodigiosas que pretendían vender a los monarcas más poderosos del mundo el fruto de sus esfuerzos. Muchas eran pura fantasía: productos alquímicos que alargaban la vida o convertían todo en oro, máquinas que se movían continuamente, artefactos que elevaban el agua a alturas insospechadas, armas que destruían armadas completas y así todo lo que la imaginación de la época podía alcanzar. Felipe II –mucho más práctico de lo que se cree y nada inclinado a fantasías– solía despachar estos memoriales con un lacónico "es sólo aire", escrito al margen del documento. Cuando veía la posibilidad de realizarlo, encargaba que se probase el artificio ante su inventor; sólo si funcionaba se concedía la correspondiente patente. Por ello, a partir de la segunda mitad del siglo XVI, las cédulas de privilegio por invención adquirieron cierta garantía de funcionamiento. Varias de estas invenciones se llevaron a la práctica, otras quedaron en el olvido, pero la colección de patentes ahora conservada en el Archivo General de Simancas, reviste en conjunto un gran interés.

A finales del siglo XVI, cuando negros nubarrones se cernían ya sobre el poderío español, se había conseguido mantener la ingeniería en un nivel acorde con la posición de España en el mundo. La invención propia no fue el único camino seguido para obtener este lugar predominante, sino que hubo que recurrir a vías que hoy día son habituales: la importación de tecnología (a veces por conquista) y el espionaje industrial.

La técnica minera fue otro de los campos más prolífico en invenciones. Su aplicación llegó a los dominios españoles del Nuevo Mundo, aunque, a finales del siglo XVI, había ciertas dificultades técnicas para extraer los profundos minerales de plata de la rica mina de El Potosí y se habían abandonado las minas de Guadalcanal, cerca de Sevilla, por falta de bombas adecuadas que permitieran desaguarlas.



3. MOLINO DE VIENTO DE EJE VERTICAL, según un dibujo del manuscrito de Francisco Lobato (hacia 1576). Las convenciones del dibujo le asemejan a una representación medieval, pero Lobato describe importantes innovaciones, como el molino de "regolfo", antecedente de las turbinas y cuyo funcionamiento guarda parecido con el de este molino de viento: en ambos se utiliza la fuerza centrífuga desarrollada por un fluido al obligarle a girar en el interior de un cilindro, pasando luego por un rodete de álabes curvos.

Los grandes viajes españoles de descubrimiento y exploración de nuevas tierras indican un dominio del arte de la náutica, sobre el que no vamos a incidir por ser ya conocido. A pesar de todos los esfuerzos, continuaba sin resolverse un grave problema: la determinación de longitudes. En otro orden de cosas, las técnicas de buceo, a pesar de los numerosos inventos de equipos patentados en España a lo largo del siglo XVI, no permitían aún largas permanencias bajo el mar.

Finalmente, hemos podido comprobar los éxitos que en el aprovechamiento de la energía del viento y sobre todo la hidráulica produjeron entre los inventores españoles. Pero quedaba un largo camino por recorrer, ya que estas energías, localizadas y variables, impedían la movilidad de las nuevas industrias que estaban demandando una fuente de energía más versátil.

Sin duda esta energía iba a ser la producida por la fuerza expansiva del vapor de agua. Aunque todavía no se conocía la naturaleza exacta del vapor, ciertos indicios revelan que algunos

científicos españoles intuían ya el poder de este nuevo y desconocido tipo de energía. En efecto, en *Los veintiún libros...* de Pedro Juan de Lastanosa, hay un párrafo que ilustra un procedimiento para producir un fuerte viento, calentando un depósito con agua, haciéndola hervir a alta presión y dejando escapar el vapor por un orificio. Este experimento se adelanta en medio siglo a la famosa especulación del francés Salomón de Caus y en un siglo a los ensayos con depósitos de vapor a presión del conocido científico Denis Papin.

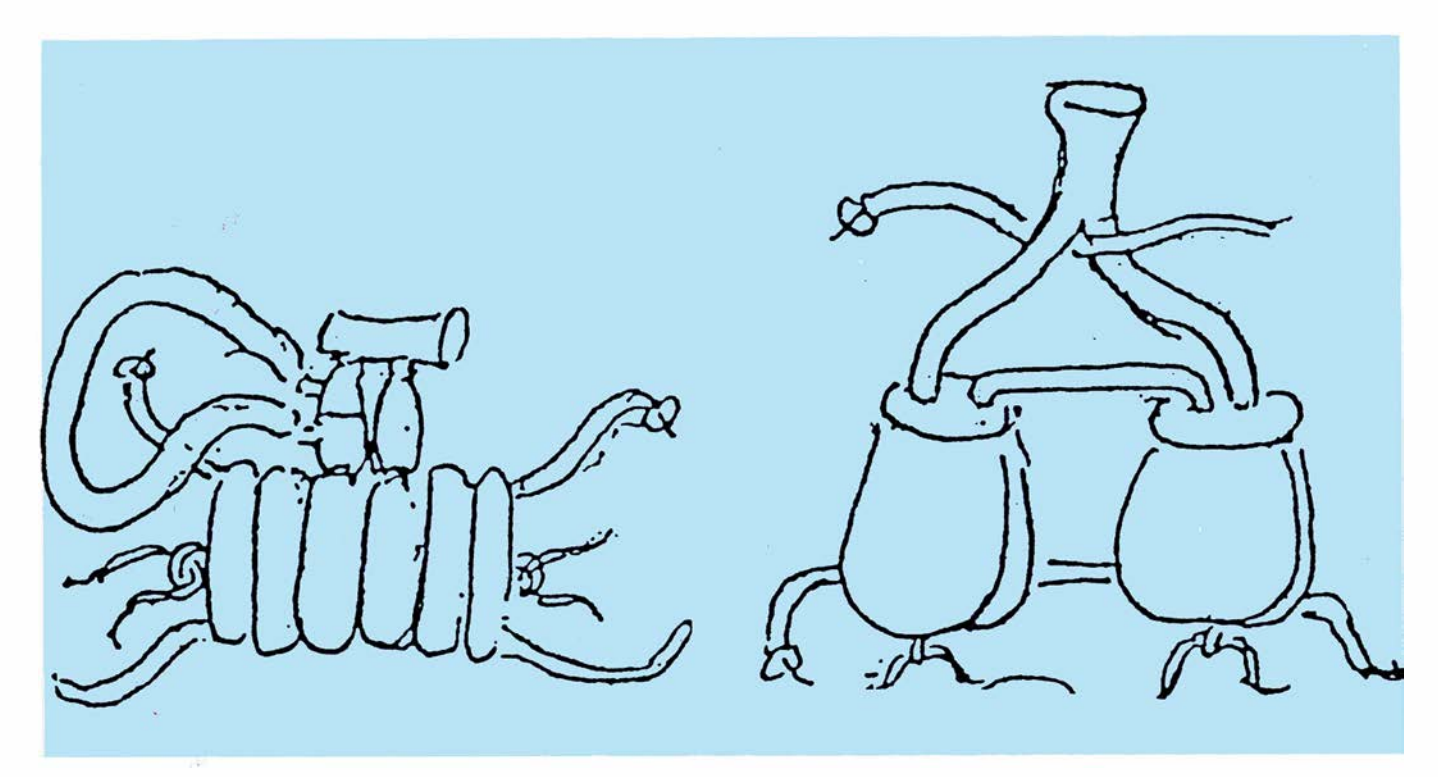
En 1606, el valenciano Juan Escrivá traducía del latín al italiano la obra de Giovanni Battista della Porta, *De Pneumaticorum*, que había sido publicada en 1601. Escrivá añadió por su cuenta un nuevo capítulo con una experiencia para desalojar el agua de un recipiente por medio de la fuerza expansiva del vapor. Al mismo tiempo, anunció que sabía varias formas de elevar el agua que aún no habían sido escritas por nadie. El camino parecía despejado hacia la utilización del vapor de agua como fuente de energía. Fue un español, Jerónimo de Ayanz, quien, con sus invenciones, resolvería gran parte de las limitaciones técnicas planteadas. Merece que le dediquemos cierta atención, ya que este genial inventor es hasta ahora un desconocido.

Jerónimo de Ayanz era de origen noble, descendiente de las familas de los Ayanz y de los Beaumont cuyo solar estaba en Navarra. Allí nació Jerónimo a mediados del siglo XVI. Después de una intensa vida en la milicia y luego en la corte de Felipe II, al que salvó de un atentado, ocupó diversos cargos en Murcia y fue gobernador de Martos. Como distinción honorífica fue nombrado Comendador de Ballesteros de la Orden de Calatrava.

El caballero Ayanz no desdeñó las artes mecánicas a pesar de su noble origen. En la España del siglo XVI hubo más nobles dedicados a cuestiones de ingeniería de lo que a menudo se cree. De esta forma, Ayanz intervino en obras de fortificación hasta que fue nombrado, en julio de 1597, administrador general de las minas del reino; por este cargo recorrió toda España inspeccionando minuciosamente las minas y haciendo personalmente numerosos ensayos para mejorar su explotación, estando a punto de perecer al inhalar gases tóxicos. Fruto de este viaje de tres años fue un detallado informe presentado ante el rey Felipe III que por entonces había trasladado provisionalmente la capital a Valladolid.

En Valladolid, ante el rey y la corte, presentó Ayanz sus numerosas invenciones, que habían sido aprobadas por el Consejo de Indias, bajo el informe favorable de dos científicos, los doctores Arias de Loyola y Firrufino. Felipe III quiso ver cómo se sumergían en el río Pisuerga unos buzos equipados con aparatos respiratorios autónomos inventados por Ayanz. La experiencia tuvo lugar en agosto de 1602 ante el rey, la corte y un numeroso público expectante que vio salir con asombro al hombre que se había sumergido más de una hora antes, sin que pareciese afectado lo más mínimo por la larga permanencia bajo el agua; hasta entonces, las campanas de bucear y otros medios disponibles en la época no permitían estar sumergido más de quince o veinte minutos. El rey, admirado, pidió a Jerónimo de Ayanz que preparase sus otras invenciones, más de cincuenta, para que le hiciese demostraciones de las mismas. No sabemos si llegaron a realizarse ante el soberano y su corte.

Recientemente hemos descubierto la patente de estas invenciones en el Archivo General de Simancas. Está fechada el 1 de septiembre de 1606 y contiene el informe del Consejo de Indias para aquellas que iban destinadas a América, así como la aprobación de los científicos citados que las habían visto funcionar. Finalmente lleva la concesión de un privilegio de explotación en exclusiva por veinte años para todas las invenciones en los territorios sometidos a la Corona española, con las garantías habituales en estos casos. El documento incluye una descripción detallada, con sus dibujos, de todos los procesos técnicos y de las máquinas e ingenios que son objeto de patente. Contiene además instrucciones para su construcción y manejo, tan detalladas que podrían realizarse de forma inmediata.



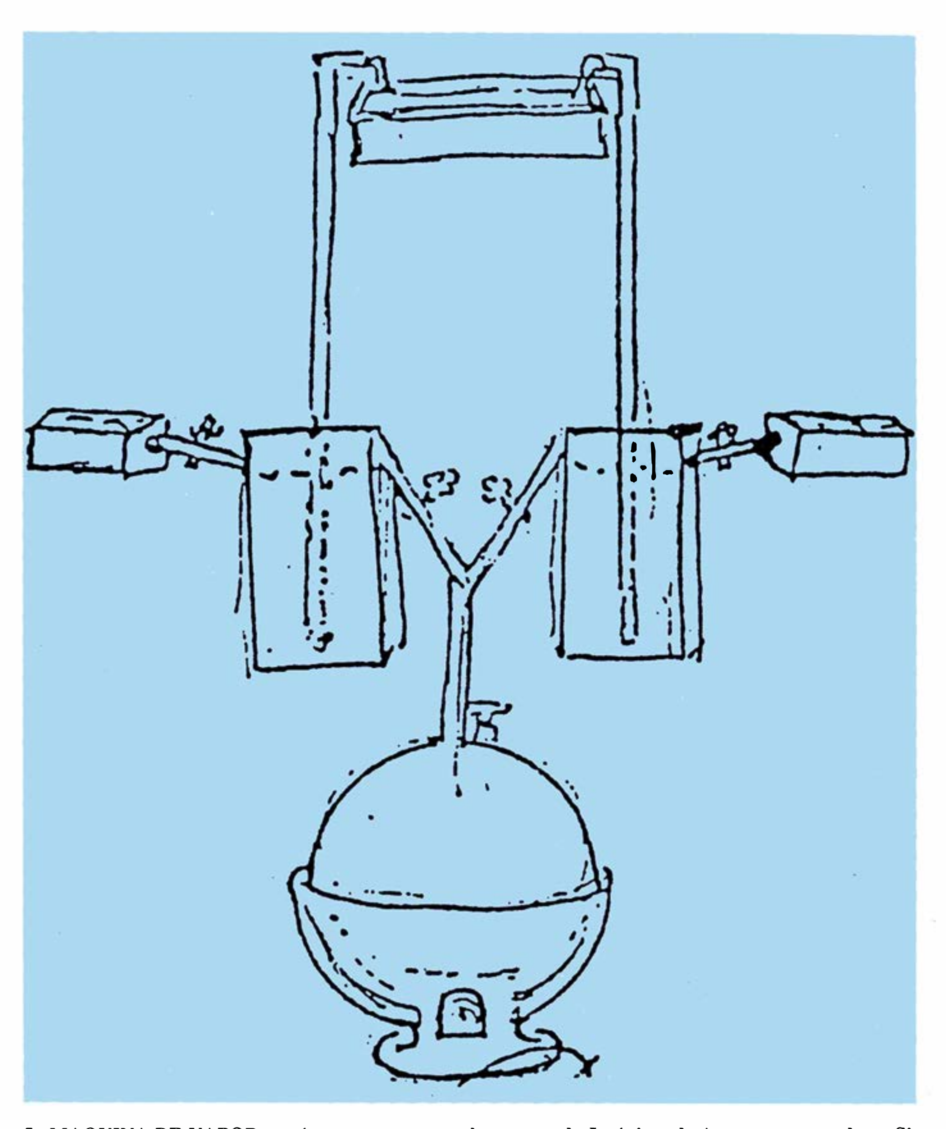
4. EQUIPOS AUTONOMOS DE BUCEO, según la patente de Jerónimo de Ayanz de 1606, conservada en el Archivo General de Simancas. Se ataban con cintas al pecho o a la espalda del buceador que por medio de válvulas respiraba el aire contenido en vejigas o fuelles que él mismo accionaba. La invención se ensayó con éxito en Valladolid ante el rey Felipe III, estando sumergido el buzo más de una hora, evolucionando dentro del agua con toda normalidad.

Los equipos de buceo son conocidos en parte por hallarse en el Archivo General de Indias de Sevilla. En la patente del Archivo General de Simancas, más completa, se describen con detalle los sistemas de válvulas respiratorias y equipos de aire a presión por fuelles y odres hinchados, así como los trajes de buzo fabricados con pieles de vaca. Siguiendo los mismos sistemas, Ayanz patentó unas barcas submarinas, totalmente cerradas y calafateadas, en las que se renovaba el aire por medio de fuelles; el ascenso y descenso se hacía por odres hinchados y contrapesos manejados por tornos giratorios. No faltan las ventanas de vidrio para la visión, ni unas mangas flexibles que salen al exterior para poder recoger materiales bajo el agua.

A pesar de la espectacularidad de estos inventos, hay otros muchos que tienen tanto o más interés. Por ejemplo, una curiosa balanza tan precisa que puede acusar el peso de "una pierna de mosca". Hay hornos y alambiques muy avanzados para su época destinados a refinados procesos metalúrgicos. Es importante señalar la contribución de Jerónimo de Ayanz, hasta ahora no reconocida, en el sistema de beneficio de la plata perfeccionando el método de amalgamación por mercurio que había inventado en 1555 Bartolomé de Medina. Gracias al estudio de la patente de Ayanz, sabemos que sus procedimientos llegaron a aplicarse con éxito en la localidad de Potosí, salvando de la ruina a esta población minera americana y permitiendo que continuara afluyendo la plata a las arcas de la Corona española. Se adelantó así a las técnicas metalúrgicas expuestas por Alonso Barba en el *Arte de los Metales*, editado por primera vez en 1640.

Otras invenciones de Ayanz también atraen nuestra atención. Una curiosa máquina, denominada "ingenio de vaivén", utiliza de forma idónea el esfuerzo del hombre para conseguir un movimiento alternativo. Pero lo más interesante es el sistema para determinar el par motor por medio de una balanza, adelantándose a los ensayos de rendimiento de las máquinas, introducidos varios siglos después por Smeaton y Prony. Ayanz utiliza, también por primera vez, el moderno concepto de *fatiga* en una máquina.

Son igualmente muy interesantes sus invenciones en los molinos, que –como hemos visto– tienen una larga tradición entre los inventores españoles. En este sentido, se patentan unos curiosos molinos de viento con originales aspas en forma de hélice; es de destacar, en el campo de la molienda, la invención de



5. MAQUINA DE VAPOR, según se representa en la patente de Jerónimo de Ayanz, conservada en Simancas. Destinada para el desagüe de las minas, representa la primera aplicación industrial del vapor de agua en el mundo, pues antecede en casi un siglo a la conocida como "El amigo del minero" de Thomas Savery.

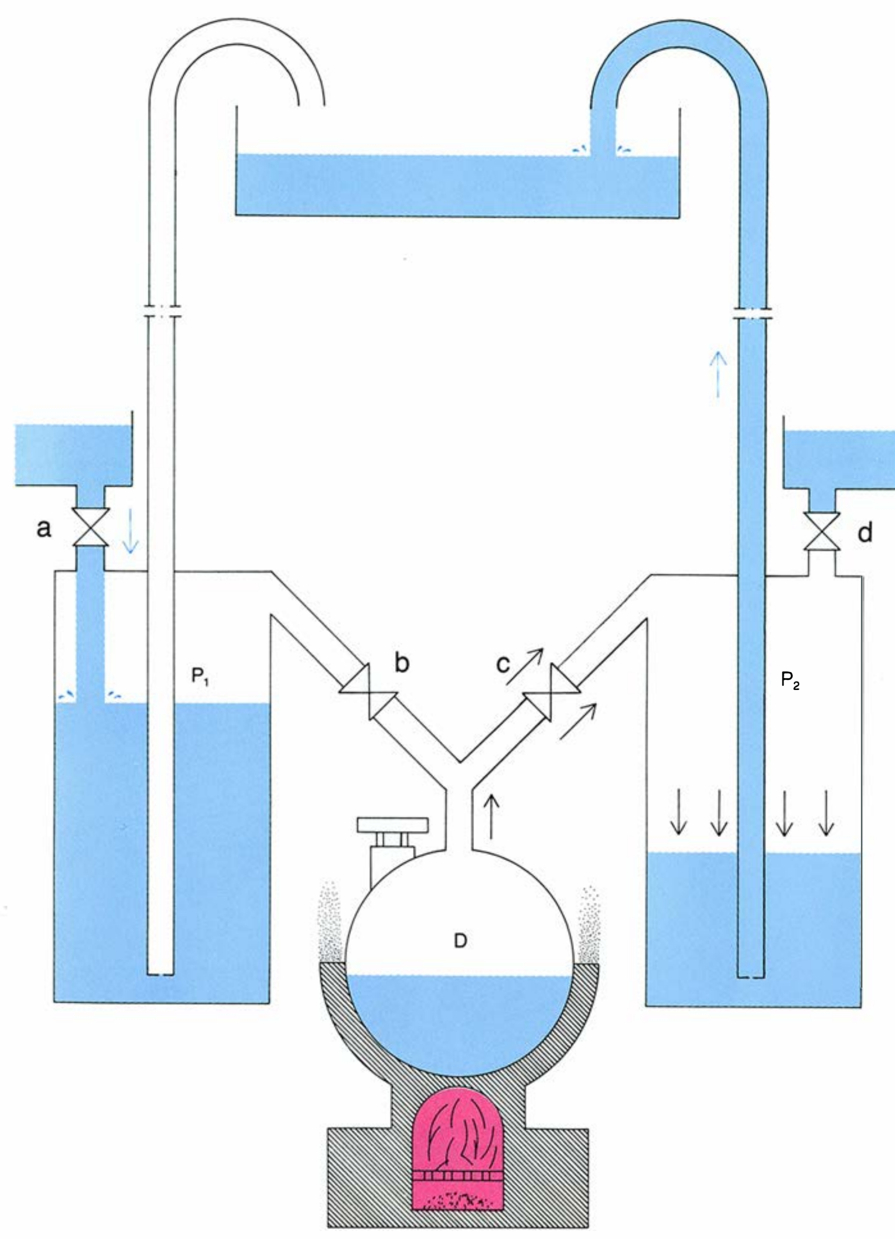
los molinos de rodillos metálicos, con una extraordinaria visión de futuro, ya que serían habituales en las fábricas de harinas a partir del siglo pasado.

Dentro del dominio de la ingeniería civil, es de destacar una presa de arco diseñada por Ayanz con una correcta definición de las tensiones de sus elementos estructurales, lo que permite aligerarla de peso y hacerla de mayor altura para elevar el nivel de agua y regar mayor superficie. Para impulsar el agua inventó unos nuevos tipos de bombas, algunas curiosas, como la de pistón roscado en forma de tornillo.

Con motivo de los problemas suscitados por el desagüe de las minas, en los que Ayanz tuvo que intervenir, fueron sus ideas las más revolucionarias. En efecto, en los siglos XVI y XVII las minas habían alcanzado una gran profundidad, lo que dificultaba su desagüe por no haber máquinas capaces de conseguirlo. La mina de Guadalcanal se había dejado de explotar por este motivo y uno de los problemas de los ricos minerales de plata de Potosí era que se encontraban en vetas profundas, cuyas infiltraciones de agua hacían imposible acceder a ellos.

Jerónimo de Ayanz comprendió que las energías tradicionales hasta entonces empleadas no servían y que era necesario recurrir a otros métodos. Uno de ellos era aprovechar algo que científicamente no se había comprendido, pero cuyo efecto se conocía: la fuerza resultante del vacío y la presión atmosférica. En consecuencia, una de las patentes de Ayanz consiste en una especie de gran sifón que permite aspirar el agua infiltrada, previamente reunida en un pozo. Sin embargo, hay una limitación en el nivel de elevación hasta la altura de la presión atmosférica, que se puso de manifiesto al intentar realizar el experimento.

Esta fue la causa que movió a Jerónimo de Ayanz a ensayar con un nuevo



6. FUNCIONAMIENTO DE LA MAQUINA DE VAPOR de Jerónimo de Ayanz. El vapor es producido en la caldera esférica (*D*), alimentada por el fuego de un hogar que la envuelve hasta la mitad para aprovechar mejor el calor. Abriendo la válvula (*a*) y estando la (*b*) cerrada, cae el agua del depósito de la izquierda (P_1). Mientras tanto, la válvula (*d*) está cerrada y la (*c*) abierta, con lo que el vapor penetra en el depósito de la derecha (P_2), presionando sobre el agua contenida en él y obligándola a subir por la tubería de la derecha hasta el depósito superior. Alternando estas operaciones, se consigue una impulsión continua de agua.

tipo de energía, la del calor, hasta entonces no utilizada industrialmente, pero cuyos efectos sobre el agua al hacerla hervir eran conocidos. Hemos visto las anticipadoras experiencias de los españoles Pedro Juan de Lastanosa y Juan Escrivá, que sin embargo no pasaron del estado de simple especulación. No sabemos si Ayanz las conocía, pero lo cierto es que utilizó su efecto para idear lo que sería la primera máquina de vapor propiamente dicha.

El fundamento de las máquinas de vapor de Ayanz es una caldera de cobre esférica, de paredes gruesas, que contiene agua hasta la mitad. A ella se adapta un horno alimentado con leña o carbón que, al calentar la caldera (denominada por Ayanz *bola de fuego*), produce vapor de agua a presión. Su energía puede aprovecharse para diversos efectos, variando la forma de la máquina en cada caso.

Si se trata simplemente de producir una fuerte corriente de aire, se verifica una salida a la caldera con una tubería terminada en un orificio muy fino que a su vez está rodeada por una tobera. Al salir el vapor por el orificio, se crea una fuerte depresión que arrastra el aire por la tobera. Es lo que ahora conocemos como un *eyector de vapor*. Las aplicaciones que Ayanz había previsto para esta máquina eran las de extraer el aire viciado de las minas o dar aire fresco a un aposento, haciéndole pasar previamente por un recinto con agua fría o nieve, un antecedente de los modernos acondicionadores de aire.

Para extraer el agua de las minas, Jerónimo de Ayanz había previsto hacer llegar el vapor de la caldera a un depósito cerrado al que previamente se había conducido el agua a elevar; la presión del vapor impulsaría el agua por una tubería conectada al depósito. Las operaciones serían controladas por una persona encargada de alimentar el fuego y manejar las válvulas del agua y del vapor en el momento oportuno.

Con este sistema se conseguiría elevar el agua de forma intermitente. Para producir un flujo continuo, Ayanz había previso dos depósitos de presión operando alternativamente: mientras uno se llena de agua procedente de la mina, al otro llega el vapor de la caldera que impulsa el agua hacia arriba. El operario debe maniobrar las llaves de ambos depósitos en el momento preciso.

Recordemos que todas estas máquinas fueron patentadas por Ayanz en 1606 y que hasta 1698 no se depositaría la patente de lo que hasta ahora se ha considerado como la primera máquina de vapor operativa, inventada por Savery. Este inventor inglés describió su ingenio en el libro *El amigo del minero*, escrito en 1702. Si comparamos ambas máquinas, con la distancia de casi un siglo, vemos que el principio de funcionamiento es el mismo, salvo el añadido de un tubo de aspiración en la máquina de Savery. La ausencia de válvulas de seguridad en ambos casos hacía que pudiesen reventar las tuberías. Los ingleses lo solucionaron construyendo la máquina atmosférica en 1712, ideada por Newcomen, utilizando para ello la patente de Savery que aún estaba vigente. Como sabemos, la invención del condensador separado por Watt medio siglo después daría lugar a la era del vapor en Inglaterra.

La historia de la máquina de vapor de Ayanz no siguió tan brillante camino. A pesar de que el inventor español dio otros modelos con depósitos de presión en varias etapas, no pudo quizá solucionar los problemas de seguridad o no obtuvo el apoyo administrativo suficiente para hacerlo. Sabemos que Ayanz intentó aplicar sus máquinas de vapor para extraer el agua de las inundadas minas de Guadalcanal, pero no conocemos el resultado de sus esfuerzos. También tenemos constancia de que intentó aplicar sus equipos de buceo para la extracción de perlas en la isla Margarita, cerca de Venezuela. En

los últimos años de su vida estaba enfrentado al problema de la determinación de la longitud, que no sería definitivamente resuelto hasta la invención de un cronómetro suficientemente exacto.

El hecho de que las invenciones de Jerónimo de Ayanz no tuvieran continuidad en la historia de la técnica española no debe restar méritos a este genial inventor al que hay que reconocer el haber conseguido realizar, y patentar por primera vez, máquinas que siglos después serían habituales en el uso industrial y cotidiano. En este sentido, su visión de futuro le coloca entre los grandes hombres reconocidos por la historia. Hay que resaltar además que sus invenciones no eran simple fantasía, sino que podían ser realizadas y de hecho llegaron a ensayarse en la práctica.

La historia de Jerónimo de Ayanz ilustra la de la invención española en una época que, por muchos conceptos, merece el nombre de Siglo de Oro. Una etapa corta pero brillante –que podemos situar entre mediados del siglo XVI y principios del siglo XVII– que se caracterizó por la abundancia de inventores que acudieron a la poderosa monarquía española ofreciendo sus ideas. Algunos inventos fueron objeto de una patente que en ciertos casos recibió una adecuada aplicación técnica. Otros, como los de Jerónimo de Ayanz, podían incluso haber generado una verdadera revolución industrial, en el caso de haber germinado en un ambiente político, social y económico como el que hubo en Inglaterra un siglo después.

En todo caso, visto lo expuesto, ya no se puede alegar que no hubo invención técnica en España y las causas de la decadencia del siglo XVII hay que buscarlas en otros factores. Debe quedar constancia, pues, de la existencia de este brillante plantel de inventores que hasta ahora no han recibido el justo reconocimiento que se merecen.

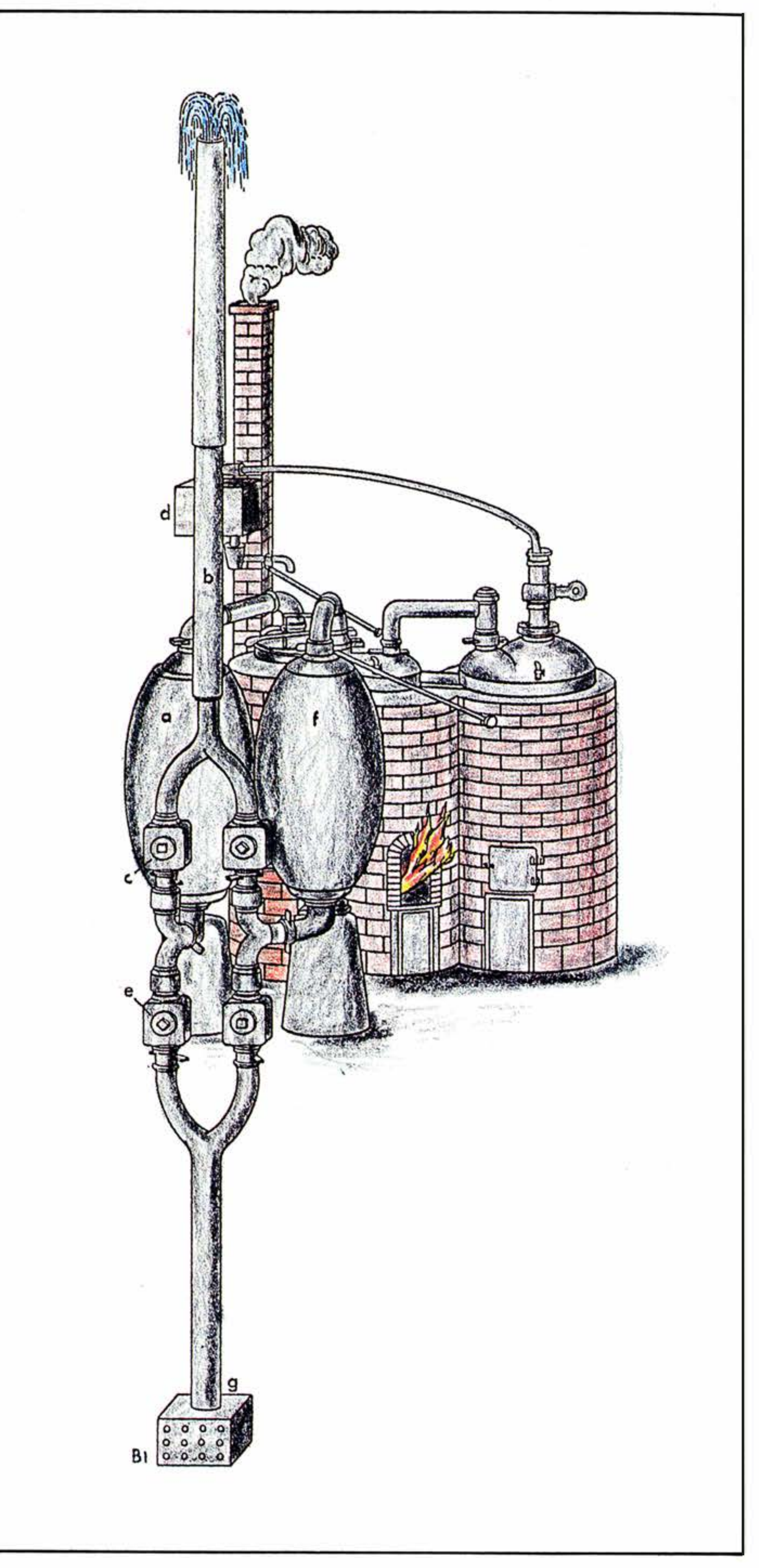
BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

LOS VEINTIÚN LIBROS DE LOS INGENIOS Y DE LAS MÁQUINAS. Pseudo-Juanelo Turriano. Madrid, 1983.

VIDA Y TÉCNICA EN EL RENACIMIENTO. MANUSCRITO DE FRANCISCO LOBATO, VECINO DE MEDINA DEL CAMPO. Valladolid, 1987.

PEDRO JUAN DE LASTANOSA Y PSEUDO-JUANELO TURRIANO. Nicolás García Tapia en *Llull*, X, 1987. págs. 51-74.

LA MÁQUINA DE VAPOR INVENTADA Y PATENTADA EN 1606 POR JERÓNIMO DE AYANZ. Nicolás García Tapia en *Técnica Industrial*, 186, 1987, págs. 3-11.



7. MAQUINA DE SAVERY patentada en 1698. Salvo el efecto de aspiración creado por el vacío, el principio de funcionamiento es similar a la de Ayanz de 1606. El vapor de agua de la caldera pasaba a un recipiente (*a*) y el agua contenida en éste subía por el tubo (*b*) a través de la válvula (*c*). Al vaciarse (*a*) se interrumpía el flujo de vapor y se enfriaba el recipiente con agua fría del depósito (*d*). Al condensarse el vapor, se creaba un vacío que aspiraba el agua por la tubería (*g*) a través de la válvula (*e*). (Basada en *The miner's friend*.)

Almacenamiento de memoria y sistemas neurales

El proceso de aprendizaje que tiene lugar durante el condicionamiento pauloviano va acompañado de cambios en las propiedades de las células nerviosas. Cambios que pueden orientar la creación de redes artificiales

Daniel L. Alkon

Un caricaturista retrata el rostro de un personaje famoso con un número mínimo de trazos, artísticamente dispuestos. El apunte proporciona suficiente información visual para evocar en el observador un patrón recordado con el que rellena los espacios no dibujados. En este sentido, el ser humano es un dispositivo reconocedor de patrones, creado en el transcurso de la evolución; las memorias son los patrones que se almacenan.

El almacenamiento de patrones —que equivale a decir formación de la memoria— está gobernado por una regla bastante simple: los elementos de un patrón quedarán asociados en una memoria, si dichos elementos se perciben más o menos simultáneamente. Un patrón se forma y retiene cuando un conjunto de elementos o piezas se asocian al mismo tiempo. Así, pues, las características de un rostro conocido se almacenan conjuntamente, no una a una. Un patrón de notas musicales se guarda en forma de melodía.

Del mismo modo, es característico de los patrones de memoria que el conocimiento de una pequeña parte desencadene el conocimiento del conjunto. Un rasgo familiar en el rostro de un desconocido puede hacer recordar otro del rostro de un amigo; unas notas de un estribillo pueden evocar un movimiento sinfónico completo. Y no tan sólo los elementos de un mismo patrón están enlazados: unos patrones llaman a otros patrones. El patrón visual del rostro de un amigo puede estar unido al patrón sonoro de su nombre y al del olor de su loción de afeitar.

Los estudios del funcionamiento cerebral empiezan a revelar cómo se establecen esos enlaces. La formación de memorias asociativas parece implicar una secuencia de cambios moleculares en lugares específicos de sistemas de neuronas. La capacidad de recepción de determinados puntos neuronales, por ejemplo, podría potenciarse intensamente con la migración de la quinasa proteica C (PKC, siglas de "protein kinase C"). Dicha proteína cursa desde el citoplasma hasta la membrana celular; al hacerlo, altera propiedades neuronales, lo que motiva que ciertas señales de entrada disparen los impulsos con mayor facilidad. El disparo de las neuronas así activadas refleja la distribución en cada neurona, y en cada sistema neuronal, de aquellos lugares que han visto su excitabilidad incrementada de modo permanente a través de la formación de memoria.

Muchas de las tranformaciones moleculares implicadas en la formación de memoria ocurren en los árboles dendríticos, ramas neuronales que captan señales de entrada. La complejidad y enorme superficie de esos árboles resulta sorprendente. Una neurona puede recibir de 100.000 a 200.000 señales desde distintas fibras terminales en su árbol dendrítico. Cada patrón sensorial probablemente estimula un número bastante restringido de puntos del árbol, y así puede retenerse un sinfín de patrones sin saturar la capacidad del sistema.

Estudios realizados por mis colaboradores y yo mismo en el Instituto Nacional de Trastornos Neurológicos y Comunicativos y Apoplejía, junto con las contribuciones de otros investigadores, han permitido deducir reglas utilizables en el diseño de simuladores por ordenador de sistemas de memoria: redes neurales. De hecho, la red neural que hemos construido según reglas biológicas ha dado un resultado bastante satisfactorio en el reconocimiento de patrones; a la inversa, las fórmulas matemáticas que gobiernan su operación han proporcionado algunos indicios acerca de los procesos biológicos de la memoria.

En mi laboratorio hemos investigado el almacenamiento de memoria y la naturaleza molecular de la formación de memoria asiciativa. Para ello, hemos analizado, en el caracol marino *Hermissenda crasicornis* y en el conejo, un tipo de aprendizaje asociativo de relativa sencillez: el condicionamiento pauloviano. En este condicionamiento, el organismo aprende a enlazar dos estímulos, a semejanza del perro de Paulov, que aprendió a unir el aroma de la comida con el tañir de una campana. La demostración de que el animal asociaba ambos estímulos se comprobó en la respuesta de comportamiento aprendida ante el sonido de la campana: la salivación.

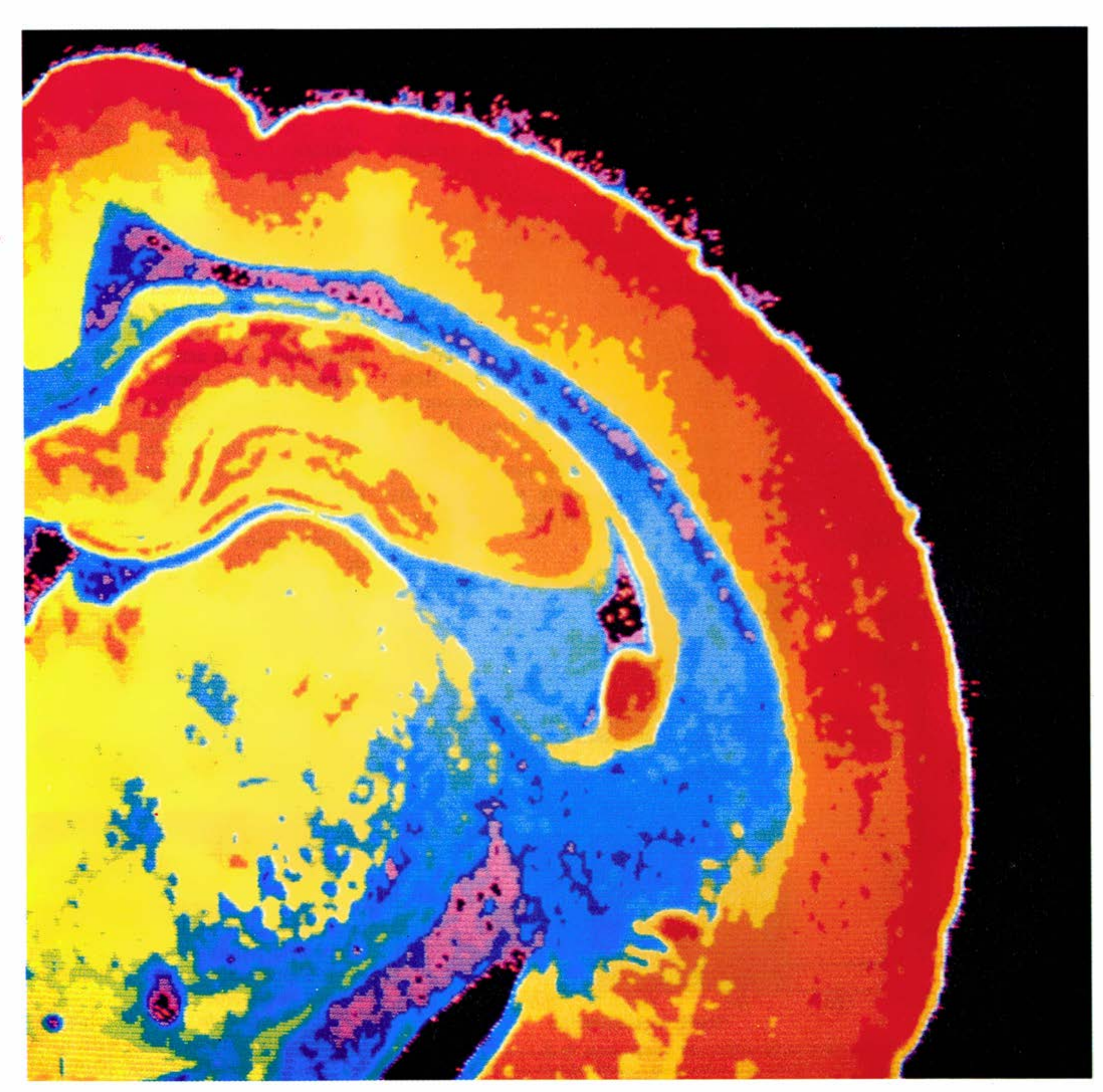
El condicionamiento pauloviano se observa en el comportamiento de aprendizaje de especies muy distintas. A pesar de la diversidad de organismos, de comportamientos y de estímulos que pueden llegar a asociarse,

DANIEL L. ALKON es jefe del laboratorio de neurobiología molecular y celular en el Instituto Nacional de Trastornos Neurológicos y Comunicativos y Apoplejía. Se licenció en medicina por la Universidad de Cornell en 1969. Su curiosidad por el comportamiento humano y su interés por la base molecular de los fenómenos naturales le impulsaron a investigar la memoria. Desde 1970 trabaja en el Instituto Nacional de la Salud; pasó gran parte de este tiempo en el Laboratorio de Biología Marina en Woods Hole, Massachusetts.

las reglas cuantitativas seguidas ofrecen un sorprendente parecido. La semejanza entre estas reglas implica que las funciones de los sistemas neurales subyacentes a la memoria asociativa en diferentes especies son, también, muy similares. Más aún, numerosas pruebas apoyan la idea de que el mecanismo de la memoria asociativa se ha conservado en el curso de la evolución.

Podemos adiestrar a *Hermissenda*, por ejemplo, para que asocie el destello de una luz con una rotación que simula la turbulencia marina; en la naturaleza, el caracol responde a la turbulencia flexionando su pie muscular para fijarse a una superficie sólida. Tras un proceso de condicionamiento, aprende a desarrollar la misma respuesta frente a la luz [véase "El aprendizaje de un caracol marino", por Daniel L. Alkon; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, septiembre de 1983]. Los conejos aprenden a asociar un tono auditivo con un soplo de aire en la superficie ocular; el soplo causa la extensión de la membrana nictitante y, con el tiempo, el conejo dilata la membrana cuando oye el tono acústico [*véase la figura 2*].

Ambos comportamientos aprendidos son ejemplos de transferencia de respuesta: una respuesta que se desencadena, normalmente, mediante un estímulo "no condicionado" (el olor de la comida, la turbulencia marina o un golpe de aire) se transfiere a un estímulo "condicionado" (el tañido de una campana, el destello de luz o el tono



1. SECCION CORTICAL de un cerebro de conejo marcado con un isótopo radiactivo para poner de relieve cuánta quinasa proteica C (PKC) hay en las membranas de las neuronas o en su vecindad. La coloración roja y amarilla indican elevadas concentraciones de la enzima, mientras que la azul y violeta muestran bajas concentraciones. Por comparación entre cortes marcados de cerebros de animales adiestrados y sin adiestrar, el autor ha logrado identificar posibles mecanismos para el aprendizaje y la memoria. Esta imagen ha sido cedida por James L. Olds, del Instituto Nacional de Trastornos Neurológicos.

acústico). A fin de aprender la asociación entre estímulos condicionados y no condicionados, un animal debe recordar la relación temporal de los sucesos. El caracol ha de recordar que la rotación acompaña siempre a un destello luminoso; el conejo, que el soplo de aire va unido a un tono acústico.

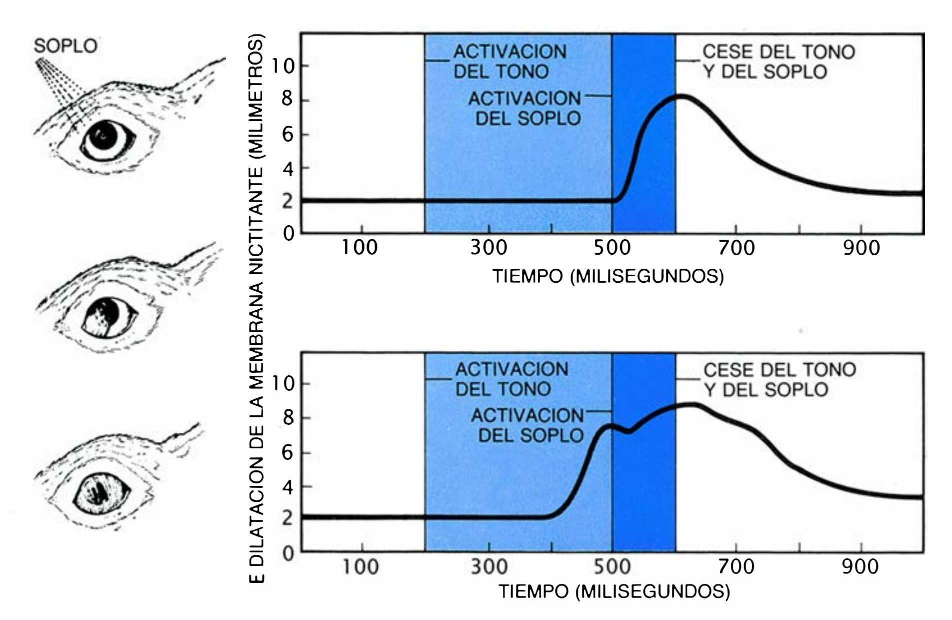
En estos organismos, los procesos de aprendizaje y memoria pueden indicar los sistemas neurales y los cambios celulares, responsables de las modificaciones de la conducta. Mis colegas y yo mismo hemos estudiado, en conejos, las neuronas piramidales CA1 del hipocampo cerebral; en caracoles, los fotorreceptores de Tipo *B*, neuronas sensibles a la luz. En ambas especies animales, la asociación temporal repetida de estímulos, durante el condicionamiento pauloviano, causa un cambio persistente de esas neuronas diana: el flujo de iones potasio a través de los canales de la membrana mengua.

Es el trasiego de iones potasio y otros lo que permite a las células nerviosas transmitir los impulsos eléctricos. Normalmente, compete al flujo de iones potasio mantener la carga en la membrana celular por debajo del umbral de potencial necesario para la propagación de señales. Cuando decrece el flujo de iones potasio, los impulsos pueden transmitirse con mayor facilidad. De este modo, la excitabilidad de las células CA1 y de los fotorreceptores de Tipo *B* aumenta, en grado significativo, con el condicionamiento.

El flujo de iones potasio no mengua en los animales control que no están expuestos a los estímulos, ni tampoco en los sometidos a estímulos de forma aleatoria. Prueba ello que no son los estímulos *per se* los que reducen el flujo iónico, sino su mutua relación temporal [*véase la figura 4*].

La reducción del flujo del ion potasio, al que se atribuye el cambio de "peso" de las señales eléctricas en los sistemas neurales del caracol y el conejo, no dura segundos, minutos u horas, sino, como mínimo, varios días y probablemente más. Este fenómeno representa un nuevo dominio temporal para el funcionamiento de los canales iónicos de membrana, un dominio temporal jamás descrito hasta ahora en células totalmente diferenciadas (maduras). Se trata de un dominio especialmente ajustado al almacenamiento de asociaciones entre estímulos.

En el caracol, donde hay pocas neuronas y se han identificado sus conexiones, se ha podido establecer que los cambios de corriente ligados al ion potasio durante el condicionamiento constituyen la principal causa del almacenamiento y de la capacidad de recuperar la asociación aprendida. Relación causal que no se ha corroborado en el conejo. Sin embargo, John F. Disterhoft y Douglas A. Coulter han mostrado, en mi laboratorio, que los cambios de corriente son específicos del aprendizaje y se localizan en las células CA1.



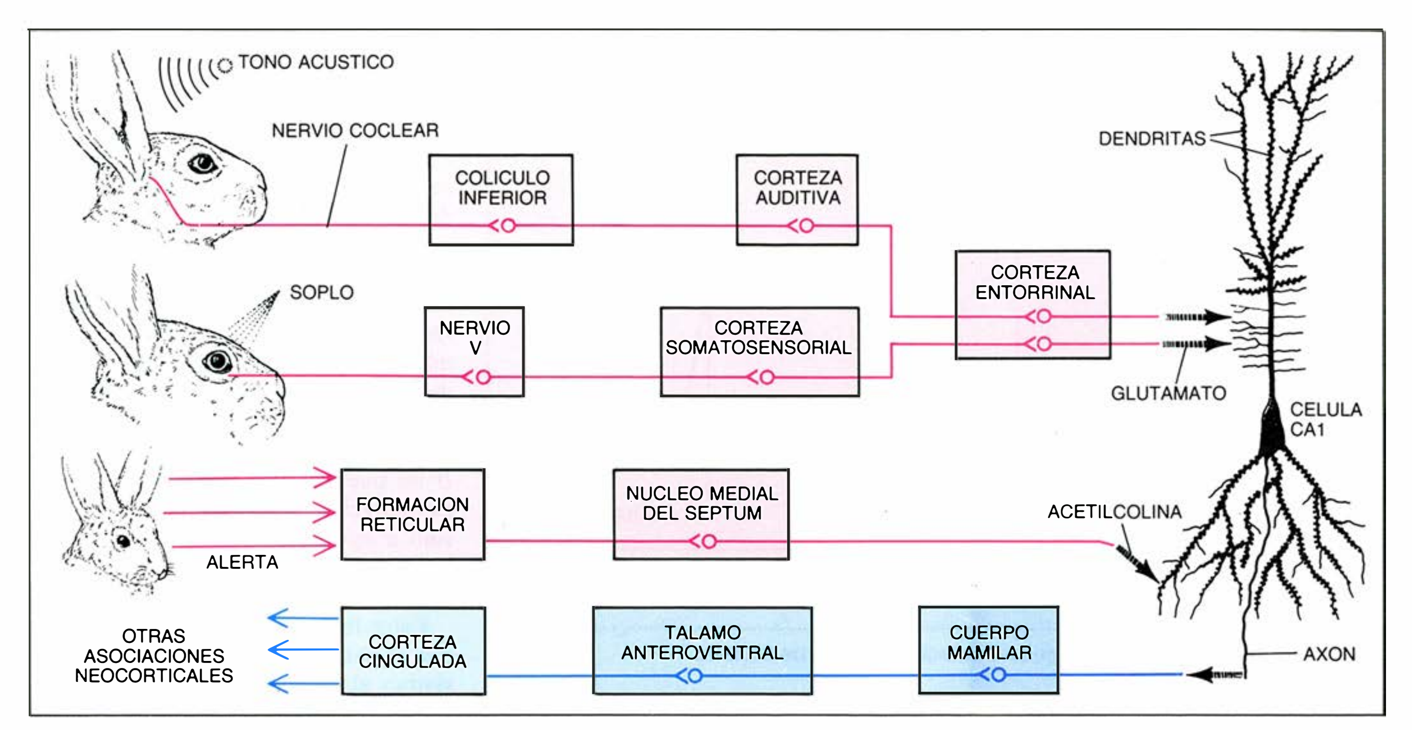
2. TRANSFERENCIA DE UNA CONDUCTA DE RESPUESTA en el conejo. Se da como resultado de un condicionamiento asociativo o pauloviano. En este caso, se le enseña a asociar un tono acústico con un soplo de aire en el ojo. La conducta de respuesta del animal —extensión de la membrana nictitante (*izquierda*)— se transfiere desde un estímulo incondicionado (el soplo de aire) hacia un estímulo condicionado (la señal acústica). Las gráficas muestran que, antes del proceso de condicionamiento, la membrana se extendía después del soplo de aire (*superior derecha*); tras unos 70 intentos, el animal aprende a dilatar la membrana cuando oye la señal acústica (*inferior derecha*). Bernard G. Schreurs aportó los datos de la figura.

Lo mismo en las células piramidales CA1 del conejo que en los fotorreceptores de Tipo *B* del caracol, los cambios iónicos parecen determinados por el movimiento de la enzima PKC, dependiente de la concentración del ion calcio. En respuesta a los cambios en la concentración de ese ion y de otro segundo mensajero, diacilglicerol, que acompañan a la asociación de estímulos sensoriales unidos por una coincidencia temporal, la PKC migra desde el citoplasma celular hasta la membrana, donde reduce el flujo de iones potasio.

La translocación y activación de la PKC puede inducirse artificialmente por la aplicación de éster de forbol. Otros investigadores han observado que la exposición de células piramidales CA1 a ese fármaco provoca la migración de la enzima hacia la membrana, lo que conlleva una mengua en el flujo de potasio equivalente a la que tiene lugar mediante condicionamiento. El condicionamiento pauloviano produce también un aumento neto de la actividad de la PKC asociada a la membrana y una disminución complementaria de la actividad asociada al citoplasma. En nuestro laboratorio, Barry Bank observó la translocación en los días siguientes al adiestramiento de los conejos [*véase la figura 6*].

Observaciones similares involucran la translocación prolongada de la PKC en la memoria asociativa del caracol. La exposición de las células de Tipo *B* de *Hermissenda* al éster forbólico, unida a la elevación intracelular de la concentración de ion calcio, mimetiza específicamente las consecuencias biofísicas del condicionamiento, es decir, se produce una reducción análoga en el flujo de iones potasio. La localización de la PKC en las células de Tipo *B* determina, de forma estricta, su efecto sobre el flujo de ion potasio. En el citoplasma, la PKC aumenta el flujo del ion potasio, rebajando así la excitabilidad de las células de Tipo *B*; en la membrana, la PKC reduce el flujo de iones potasio, realzando la excitabilidad celular. Los agentes que bloquean la translocación de la PKC bloquean también la reducción de flujo del ion potasio producida por el condicionamiento asociativo.

En *Hermissenda*, se han obtenido pruebas bioquímicas de la activación del control molecular por parte del condicionamiento a través de mediciones de la proteína diana para la PKC. La enzima actúa agregando grupos fosfato a substratos proteicos. Su diana,



3. VIAS NEURALES implicadas en procesos de condicionamiento. Convergen en las células piramidales CA1 del hipocampo. Los impulsos que proceden del ojo y el oído interaccionan con las células CA1 mediante un neurotransmisor, el glutamato. La respuesta, que tiene relación con la calidad del aprendizaje, pasa a las células CA1 mediante otro neurotransmisor, la acetilcolina. Las células CA1 del hipocampo responden enviando impulsos a otras partes del córtex.

una proteína de un peso molecular de unos 20 kilodalton, muestra un cambio en el número de sus grupos fosfato como consecuencia del condicionamiento. La exposición de células de Tipo *B* al éster de forbol conlleva, a su vez, una adición de grupos fosfato a esta proteína.

Recientemente, mi colega Thomas J. Nelson y yo mismo hemos observado que dicha proteína es fijadora de GTP, implicada quizás en la regulación de los canales iónicos. Tras inyectarla en células de Tipo *B*, comprobamos una reducción en el flujo de ion potasio similar al encontrado a raíz del condicionamiento. Esta proteína de 20 kilodalton podría tener funciones, en el contexto del aprendizaje, análogas a las que las proteínas G desempeñan en el contexto del desarrollo y de los oncogenes.

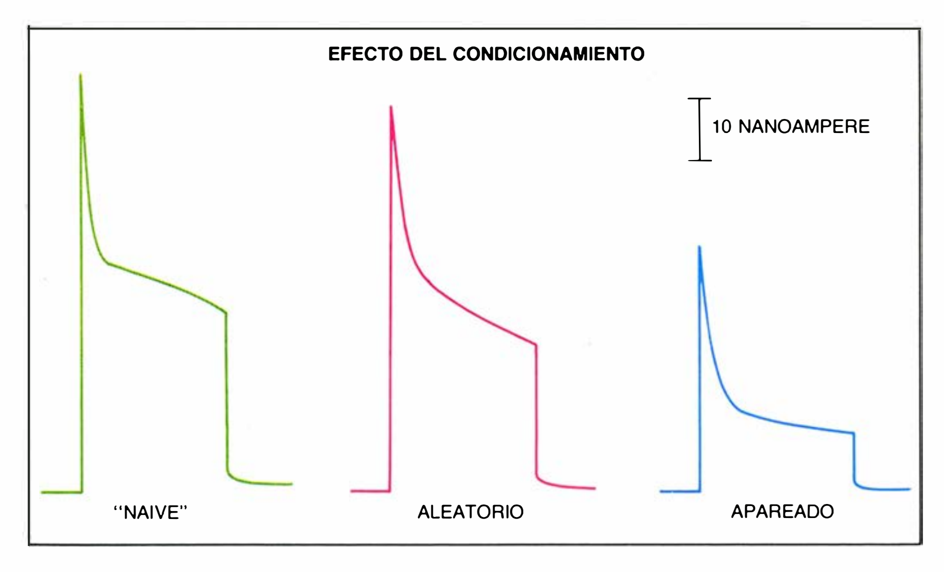
Otras observaciones, tanto en caracol como en conejo, sugieren la presumible implicación de una segunda enzima en la mengua del flujo de iones potasio en el condicionamiento pauloviano. Me refiero a la CAM quinasa II, otra enzima dependiente de la concentración de iones calcio. Esta quinasa fosforila la proteína diana de 20 kilodalton en *Hermissenda* y reduce el flujo de ion potasio en presencia de elevados niveles intracelulares de ion calcio. Bank en nuestro laboratorio y Robert J. DeLorenzo y sus colaboradores en la facultad de medicina de Virginia encontraron que la actividad de esta enzima aumentaba en las regiones de las células CA1 los días siguientes al condicionamiento de los conejos, incremento que no se observa en los animales control. La quinasa se concentra en los lugares postsinápticos (receptores de señal) de los árboles dendríticos de las neuronas CA1.

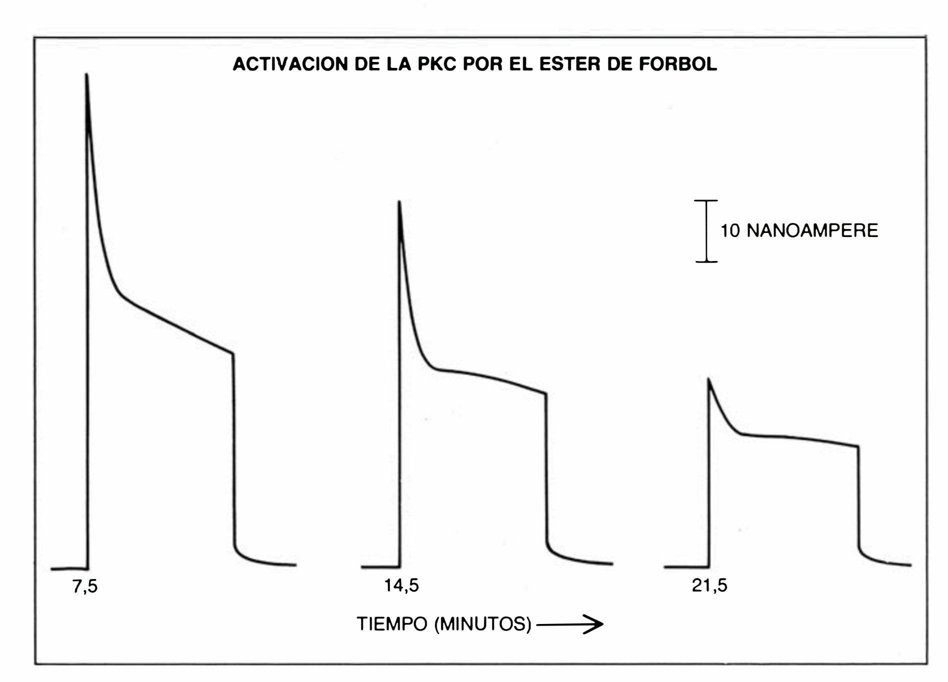
La activación de ambas quinasas podría inducir una reducción del flujo de ion potasio más duradera que la obtenida con cualquiera de ellas por separado. Se sabe que la cooperación entre estas enzimas interviene en importantes efectos fisiológicos: agregación plaquetaria, secreción de insulina o contracción muscular; se sabe, asimismo, que la translocación de la PKC explica la prolongación y potenciación de la capacidad de respuesta a señales eléctricas, químicas u hormonales en distintas situaciones fisiológicas. El carácter ubicuo de la PKC subraya la idea de que el mecanismo fundamental para extender el dominio temporal de la función de la célula nerviosa ha persistido en el curso de la evolución.

El metabolismo de la PKC podría acomodarse muy bien al proceso de almacenamiento de memoria. Posee, parece, la capacidad de desencadenar cambios celulares que se mantienen durante largos períodos e incluso pueden ser permanentes. La enzima actuaría alterando la síntesis proteica. La translocación de la PKC inducida por el éster de forbol altera sustancialmente la síntesis de varias proteínas neuronales en *Hermissenda*, desajuste que se deja sentir en la reducción del flujo de iones potasio estimulada por calcio que ocurre tras la translocación de la PKC.

Hemos conseguido relacionar el comportamiento de aprendizaje de *Hermissenda* con el metabolismo proteico de las neuronas implicadas funcionalmente en el almacenamiento de la memoria. Existe una estrecha correlación entre el almacenamiento de memoria y la cuantía celular de algunas proteínas; una de éstas es el sustrato de 20 kilodalton para la PKC. Nelson, en mi laboratorio, encontró que, en el ojo del caracol, la eficacia del almacenamiento de memoria guardaba una estrecha relación con incrementos en la síntesis de algunos tipos de ARNm, un precursor molecular de la proteína. Y resulta que uno de los ARNm corresponde al de la proteína de 20 kilodalton de *Hermissenda*.

En *Hermissenda*, las alteraciones en la estructura de las ramificaciones de las células de Tipo *B* se ven acompañadas de cambios en la síntesis proteica derivados del almacenamiento de memoria asociativa. Cambios que se ponen de manifiesto si inyectamos un co-





4. CAIDA DE LAS CORRIENTES ASOCIADAS AL ION POTASIO en las células fotorreceptoras de Tipo *B* de caracoles marinos adiestrados en asociar un destello luminoso con una rotación; los animales flexionan su "pie" en respuesta. Se da una notable disminución en las corrientes de ion potasio en los animales condicionados mediante la exposición simultánea a la luz y a la rotación (*arriba*); las corrientes de ion potasio son mayores cuando los estímulos aparecen de forma aleatoria o cuando los animales no se someten a estimulación ("naive"). La activación de la PKC en las células de Tipo *B* con éster de forbol duplica el efecto del condicionamiento (*abajo*). El éster de forbol provoca la migración de la PKC hacia la membrana de las neuronas; por ello, se considera que la mengua del flujo de potasio viene mediada por la presencia de PKC cerca de la membrana celular o en su vecindad. Efectos similares se han observados en células CA1.

lorante a través de un microelectrodo insertado en el cuerpo celular. Cinco días después de la exposición de los caracoles a ensayos condicionantes o de control, las ramificaciones de las células de Tipo *B* de los animales adiestrados abarcan un volumen mucho más condensado que las correspondientes en animales control [*véase la figura 8*]. El volumen de las ramificaciones guarda una relación evidente con la cuantía de la reducción del flujo de ion potasio.

La naturaleza de esta modificación estructural sugiere una hipótesis. Cabe la posibilidad de que las ramificaciones implicadas en las interacciones sinápticas que median el reciente aprendizaje del proceso de asociación entre luz y rotación mantengan su número o lo eleven, mientras que las sinapsis que median respuestas alternadas ante estímulos lumínicos se eliminen o reduzcan. Nos encontramos sometiendo a prueba esa hipótesis; inyectamos colorantes de distintas clases en células con interacciones sinápticas conocidas, y contamos luego el número de contactos sinápticos establecidos por las células de Tipo *B* con células que se sabe median respuestas diferentes.

Los animales mantenidos o criados en ambientes estimulantes tienden a desarrollar más ramas en las neuronas corticales que los sujetos a una estimulación sensorial mínima. Eso es cierto. Pero la focalización observada en *Hermissenda* en virtud del almacenamiento de memoria asociativa difiere de los cambios estructurales medidos en modelos de aprendizaje no asociativos. Los cambios de células de Tipo *B* no pueden, por tanto, deberse a la estimulación sensorial por sí misma, sino a la distribución en el tiempo de los estímulos: al patrón de estimulación.

Estos hallazgos nos inducen a pensar que el patrón de estimulación se representa y almacena por el patrón físico de ramas y sinapsis, lo mismo que se representa y almacena por el patrón de señales eléctricas y el patrón de activación molecular. En el campo del desarrollo, se aprecia también la eliminación o la reducción de contactos sinápticos cuando varias neuronas tratan de establecer sinapsis con una diana neuronal común. Jean-Pierre Changeux, del Instituto Pasteur de París, y Gerald M. Edelman, de la Universidad Rockefeller, han postulado, a partir del concepto de desarrollo, que podría darse un "darwinismo neural" durante el acoplamiento de aprendizaje y memoria. La focalización de los fotorreceptores de Tipo *B* en *Hermissenda* aporta una justificación biológica para la extrapolación propuesta por esos investigadores.

A la hora de plasmar el proceso de formación de una memoria asociativa, he ido de los estímulos ambientales a las señales eléctricas en los sistemas neurales, luego al flujo de iones a través de la membrana celular, a los controles moleculares que regulan ese flujo, después a las alteraciones en la síntesis proteica y, por último, a los cambios experimentados en la estructura de la arquitectura neuronal. De esta progresión se desprende el carácter dinámico de las neuronas implicadas en el almacenamiento de memoria. Al haber alcanzado su estado de madurez y diferenciación, han perdido su capacidad de división, pero sí pueden, de dividirse, realizar importantes transformaciones. En *Hermissenda* hemos demostrado que esas transformaciones se dan en distintos dominios tempora-

les; tardan desde segundos hasta días y períodos más largos, y afectan a dominios espaciales de las células.

Parece ser que las neuronas del hipocampo de conejo pueden también sufrir cambios en distintos dominios espaciales de las células. Podemos seguir los pasos de esas modificaciones con una sonda molecular utilizada ya por Solomon H. Snyder, Paul F. Worley y sus colegas en la Universidad Johns Hopkins. Estos descubrieron que podían medir la distribución de la PKC en las estructuras cerebrales, si marcaban la enzima con éster de forbol radiactivo. Cuando se mantiene suficientemente baja la concentración de éster de forbol, el marcaje no causa translocación de la PKC y sólo señala las regiones de las neuronas y poblaciones neuronales que han aumentado la cuantía de PKC en la región de la membrana celular.

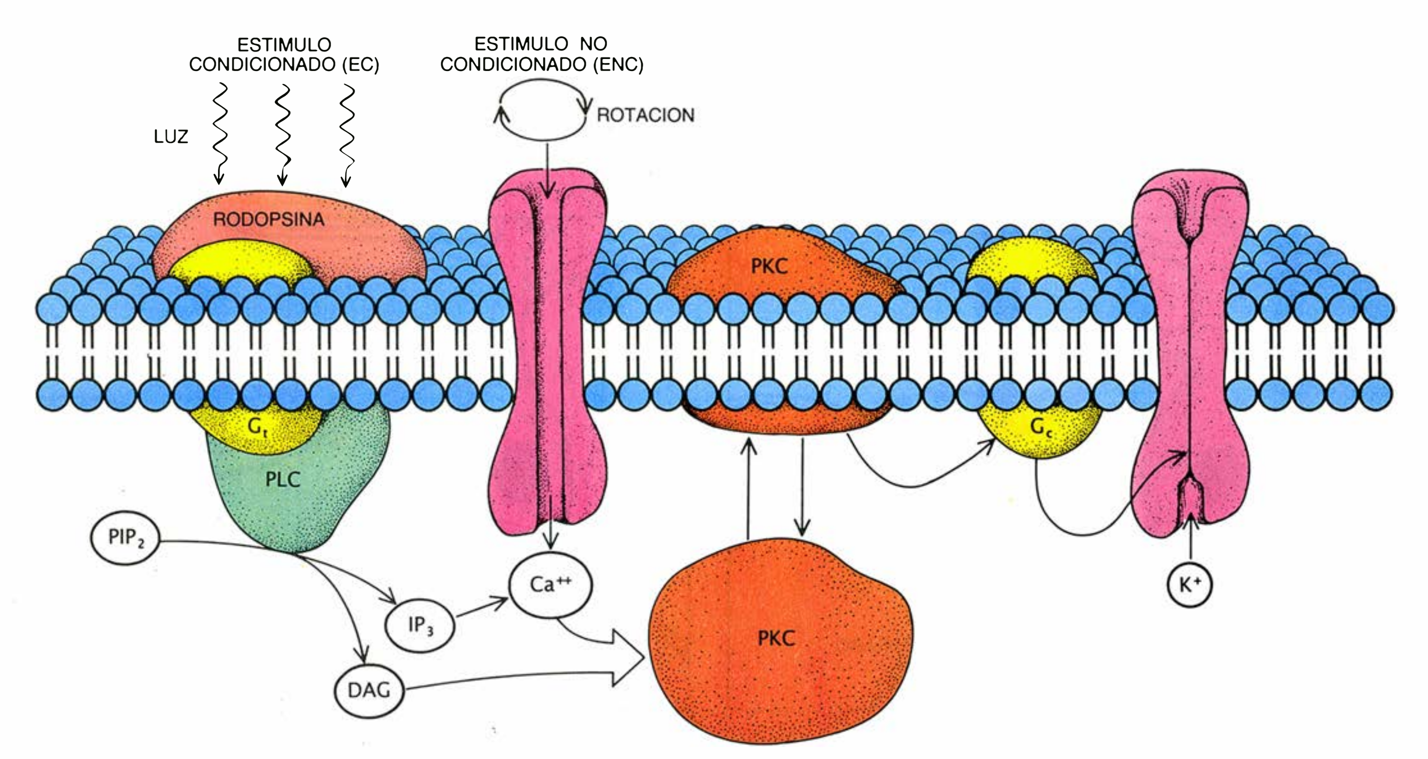
James L. Olds, de nuestro laboratorio, acaba de poner de manifiesto que, el día siguiente al ensayo de aprendizaje, la PKC asociada a la membrana alcanza valores máximos cerca de la región de los cuerpos neuronales de las células CA1 y, en menor proporción, en la región de las dendritas (las ramificaciones que reciben los impulsos sensoriales). Sus descubrimientos sugieren además que, tres días después del condicionamiento, la distribución del marcaje de la PKC ha sufrido una transformación total: el marcaje se ha intensificado más en las zonas dendríticas que en los cuerpos celulares. Dicho de otro modo, mientras que el dominio temporal del almacenamiento de memoria se prolonga de uno a tres días, el dominio espacial de la PKC ubicada en la región de las membranas podría desplazarse desde el cuerpo celular hasta las dendritas.

El trasiego del dominio espacial de la distribución de PKC podría proporcionar algunas pistas que ayudaran a desentrañar la cuestión general del almacenamiento de memoria. Nuestros propios descubrimientos, así como los de Richard F. Thompson, de la Universidad de California del Sur, y de Theodore W. Berger, de la Universidad de Pittsburgh, indican que el almacenamiento de asociaciones discretas en el conejo parece reclamar la intervención de muchas células, idea que se opone a nuestra intuición de la participación exclusiva de un número limitado de células. ¿Cómo van a poder modificarse tantas células CA1 con un solo fenómeno de condicionamiento, sin perder la capacidad de almacenar muchas asociaciones más?

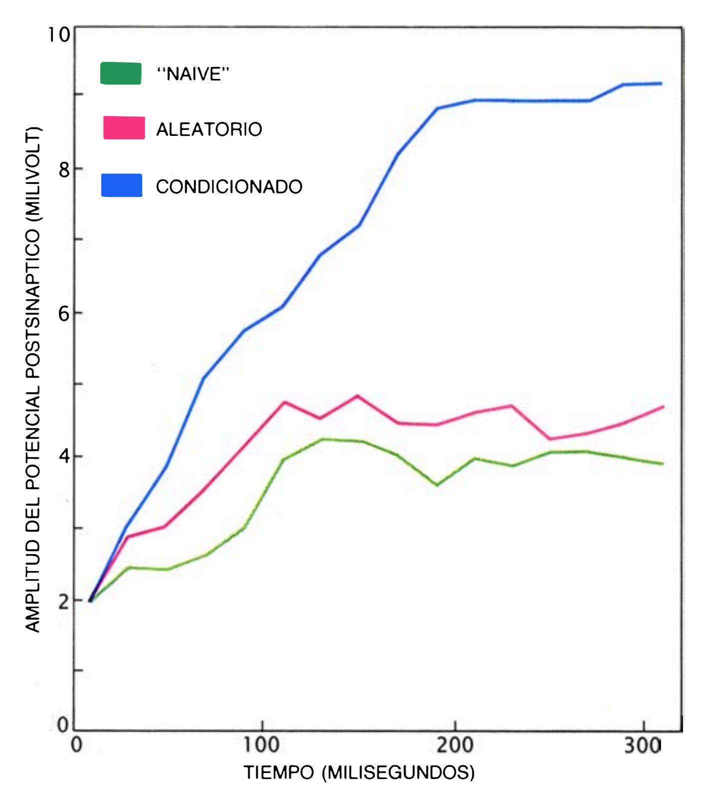
Pudiera suceder que sólo las señales de entrada restringidas a pequeños compartimentos de los árboles dendríticos —y de los cuerpos de las células CA1— fueran capaces de alterar las corrientes del ion potasio, la distribución de la PKC y la síntesis proteica. Los cuerpos celulares activados podrían entonces aumentar el transporte de moléculas clave en todas las ramas importantes de los árboles dendríticos, aunque las moléculas se alojarían en determinados puntos o ejercerían su efecto exclusivamente en los pequeños compartimentos que en un principio hubieran recibido señales de entrada debidamente temporalizadas [*véase la figura 7*].

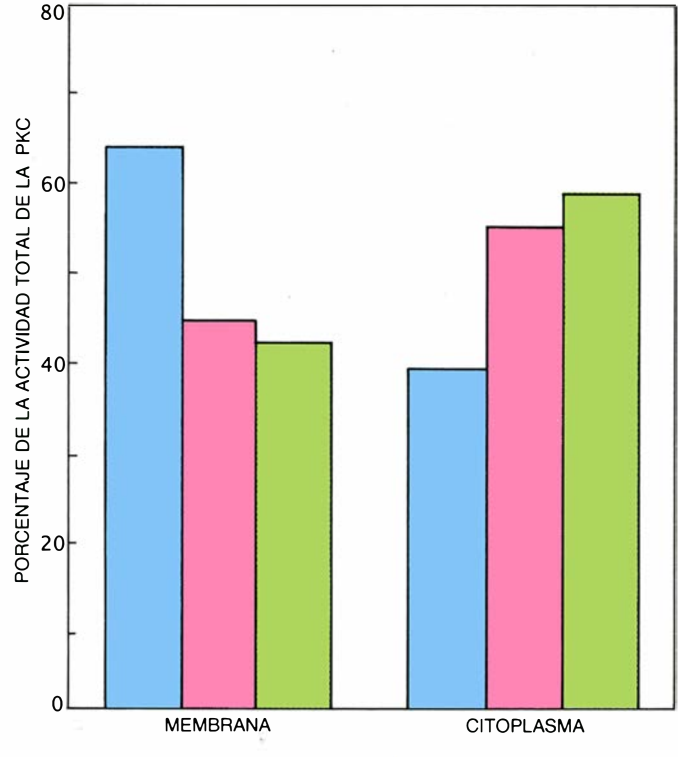
Esta secuencia de acontecimientos explicaría por qué tantos (entre un 50 y 60 por ciento) cuerpos celulares de las CA1 en animales condicionados muestran al principio cambios biofísicos y bioquímicos inducidos por el condicionamiento. Si una asociación termina por instalarse en ciertos compartimentos dendríticos (como sugeriría la distribución de la PKC en las neuronas del conejo tres días después del condicionamiento), podría preservarse la especificidad del almacenamiento de memoria sin saturar la capacidad de las células CA1 para guardar información adicional.

El modelo conceptual de trabajo al que he llegado a través de las investigaciones realizadas en mi laboratorio se opone, en cierta medida, a las hipótesis avanzadas hasta la fecha so-



5. DURANTE EL CONDICIONAMIENTO ASOCIATIVO, las interacciones de membrana refuerzan la translocación de la PKC. En este esquema de la membrana de una célula de Tipo *B* de caracol, la estimulación por la luz y la rotación inician una cadena de sucesos que culminan con el desplazamiento de la PKC desde el citoplasma hasta la membrana celular, con la consiguiente reducción del flujo de iones potasio a través de los canales iónicos de membrana.

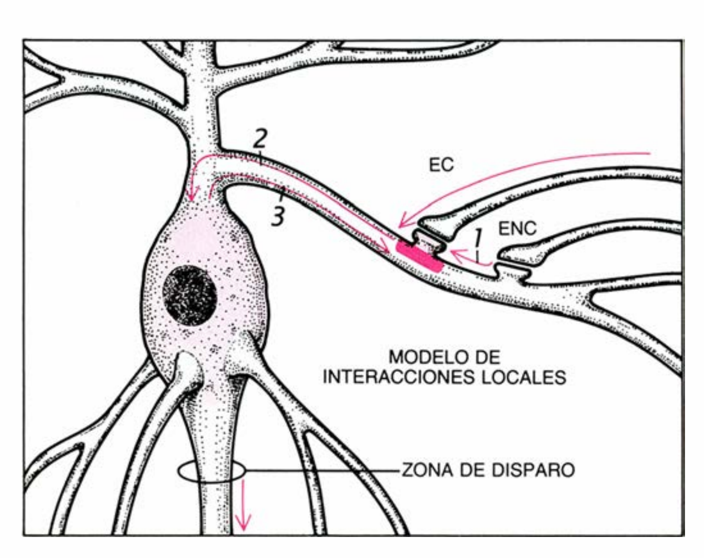


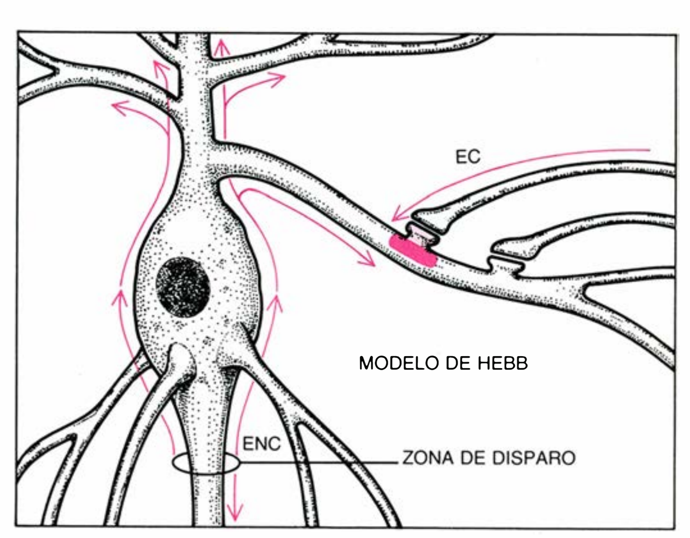


6. CONEJOS CONDICIONADOS Y CONTROLES muestran distintos perfiles eléctricos y moleculares en las neuronas CA1. Existe una correlación significativa entre el condicionamiento y la suma de amplitudes de las señales postsinápticas generadas en las neuronas (*izquierda*); la suma de señales es mayor en los animales condicionados. El porcentaje de la PKC en membrana y citoplasma de las células CA1 (medida por la actividad asociada a la enzima) difiere también entre animales control y condicionados (*derecha*). Un mayor porcentaje de enzima está asociado a la membrana en los animales condicionados.

bre la naturaleza del almacenamiento de memoria. Hace cuatro décadas, Donald O. Hebb, de la Universidad McGill y pionero del estudio de la memoria, propuso que ese almacenamiento exigía la llegada simultánea de señales de una terminación presináptica con el desencadenamiento de activación en el elemento postsináptico. Ello requería actividad de disparo en el punto postsináptico; por consiguiente, el modelo de Hebb suponía que toda la neurona participaba en cada proceso de almacenamiento. La estimulación de una célula postsináptica (en el modelo de Hebb coincidente con la activación presináptica) afectaría a todos o casi todos los compartimentos dendríticos.

Por contra, lo observado en *Hermissenda* y lo que se deduce de los estudios en el hipocampo del conejo nos mueve a creer que hay una extensa interacción local entre terminaciones postsinápticas. La transmisión de señales eléctricas y posiblemente químicas entre lugares postsinápticos —sin desencadenar actividad en ellos— parece resultar decisiva para la iniciación del almacenamiento de memoria. Los mecanismos

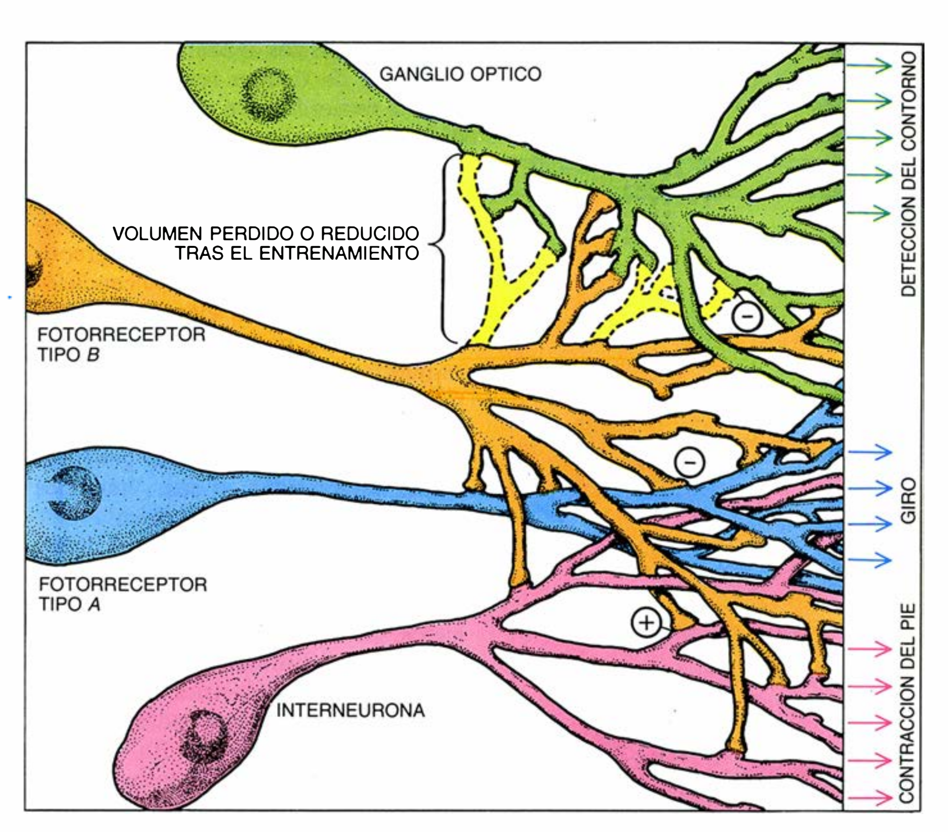




7. MODELOS DE CAMBIOS inducidos por el aprendizaje y su variación con respecto a las interacciones necesarias para producir tales modificaciones. El modelo de interacciones locales, en el que se basa la investigación del autor, postula que los cambios (*color*) se originan cuando, en un lugar receptor de la neurona, un estímulo de tipo condicionado (EC) se asocia temporalmente con otro de tipo no condicionado (ENC) en un punto receptor adyacente (*1*) de la neurona. La interacción se comunica al cuerpo celular (*2*), y genera factores que vuelven al punto de interacción, "conectándolo" (*3*). El modelo de Hebb considera, por contra, que los cambios se desencadenan a la llegada de un EC al receptor en el mismo momento que se excita la neurona en respuesta al ENC.

de almacenamiento local tienen más sentido desde un punto de vista fisiológico, ya que cada neurona puede guardar varios miles de recuerdos si las interacciones clave están compartimentadas en el árbol dendrítico. Charles D. Woody, de la Universidad de California en Los Angeles, ha observado cambios postsinápticos también en el gato.

Se acaba de sugerir una función similar de las interacciones locales en la potenciación a largo plazo (PLP), modificación neuronal inducida eléctricamente que ha servido de modelo para las alteraciones instadas por estímulos naturales durante el aprendizaje. Holger Wigstrom y Bengt Gustafsson, de la Universidad de Göteborg, Per O. Andersen, de la Universidad de Oslo, Thomas H. Brown, de la Universidad de Yale, Roger Nicoll, de la Universidad de California en San Francisco, y Gary Lynch, de la Universidad de California en Irvine, entre otros, han estudiado estas interacciones locales durante cambios transitorios de una o dos horas de duración en células nerviosas. Interacciones que reciben el nombre de PLP asociativo.



8. FOCALIZACION DE LAS RAMIFICACIONES NEURONALES implicadas en el condicionamiento. Ese proceso podría eliminar o reducir el volumen de las vías neurales que no unen el estímulo condicionado y la conducta de respuesta. Este modelo esquemático muestra un área de la célula fotorreceptora de tipo *B* del caracol, donde puedan producirse reducciones en el volumen del árbol de ramificación neuronal.

Los lugares neuronales donde ocurren los cambios inducidos durante la PLP no asociativa parecen ser de dos tipos, esto es, de naturaleza presináptica, como fue sugerido por Timothy V. P. Bliss y sus colaboradores, del Instituto Nacional de Investigaciones Médicas de Londres, y por Aryeh Routtenberg, de la Universidad de Northwestern, y de naturaleza postsináptica, como demostraron, entre otros, Wigstrom, Gustafsson, Lynch y Andersen. Algunos, en particular Eric R. Kandel y sus colaboradores, de la facultad de medicina y cirugía de la Universidad de Columbia, ponen el énfasis en un lugar presináptico para el almacenamiento de memoria no asociativa que podría ocurrir, por ejemplo, durante la habituación o sensibilización.

Muchos de los interrogantes que plantean estas investigaciones podrían despejarse con la ayuda de sondas moleculares de la PKC dotadas de suficiente resolución celular y subcelular. Se pondrían así de manifiesto sutiles diferencias en la distribución de la PKC, inducidas por el aprendizaje, se desarrollaran en compartimentos intracelulares de la neurona, del árbol dendrítico o en sistemas neuronales completos.

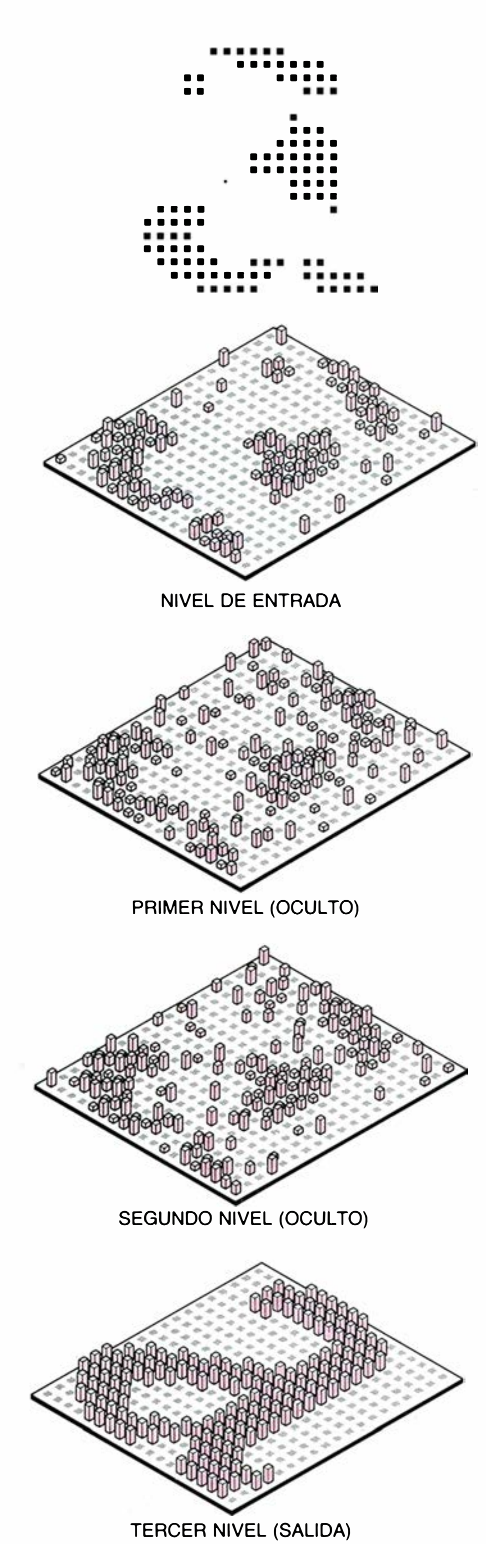
La descripción matemática precisa de las imágenes generadas durante el almacenamiento de memoria podrían colaborar a la hora de sopesar los modelos teóricos sobre adquisición y almacenamiento de información por parte de los sistemas neurales del cerebro. Modelos que se están incorporando también en "redes neurales" informatizadas. Los fenómenos observados por nosotros y otros científicos han dirigido e impulsado la construcción de estos modelos artificiales de almacenamiento de memoria por sistemas neurales.

Mis colegas Thomas P. Vogl y Kim L. Blackwell, del Instituto de Investigaciones Medioambientales de Michigan, y yo pensamos que podría ser útil introducir los mecanismos de conservación de la memoria, del caracol y del conejo, en un sistema artificial de este tipo. En ese sentido, y a tenor de nuestras observaciones, el almacenamiento de memoria empieza cuando los estímulos condicionantes generan señales eléctricas, sincronizadas al objeto de que converjan e interaccionen localmente en lugares neurales críticos, como son las células fotorreceptoras de Tipo *B*.

Nos sugería este dato el primer principio para el diseño de redes teóricas de aprendizaje asociativo: el peso de la interacción sináptica, es decir, la transferencia de señales entre elementos del sistema artificial, se modifica localmente, entre señales de entrada próximas, en función de la relación temporal de dichas señales, así como de la repetición de estas señales sincronizadas. En la red neural del ordenador, los pesos sinápticos no deberían modificarse en función de las señales de salida de una célula diana común. La alimentación de un elemento en nuestra red tendría que reforzarse sólo en función de la razón entre el patrón temporal de la estimulación y otras señales de entrada en dicho elemento, mas no en función de la excitación del propio elemento.

Otro principio del diseño partió del estudio sobre el proceso de adquisición de memoria en los seres humanos. Cuando un sujeto almacena un patrón (un rostro, un nombre, una melodía, etc.) compara una representación del patrón con los patrones que percibe en el medio. Un modelo teórico de memoria debería tener la misma capacidad; es decir: no sólo debiera poder almacenar un patrón y recuperarlo posteriormente, sino que también habría de poseer la capacidad de representarlo en tiempo real, del mismo modo que las áreas del cerebro representan acontecimientos de la experiencia humana mientras están ocurriendo.

Una analogía con el condicionamien-



9. PATRON DE RECONOCIMIENTO de la red artificial del autor. Opera siguiendo muchas de las reglas establecidas en sistemas biológicos. Cuando se entrena a una red para reconocer un patrón, una "a" minúscula por ejemplo, los puntos receptores que participan en el reconocimiento tienen más "peso" que los que no intervienen; es decir, aumenta su excitabilidad. Aquí, el peso sináptico está representado por la elevación de los elementos sobre las láminas. El incremento de la excitabilidad ayuda a mantener unidas las neuronas implicadas en el proceso de reconocimiento, cuando sólo se presenta una parte del patrón. Thomas P. Vogl, adscrito al Instituto de Investigaciones Medioambientales de Michigan, ayudó al autor en el diseño de este dibujo.

to pauloviano nos ayudará a definir las funciones de tiempo real y recuperación de recuerdos. Un estímulo no condicionado (verbigracia, el olor de la comida, la rotación o un soplo de aire) generará respuestas eléctricas en tiempo real en el sistema neural y una respuesta de comportamiento estereotipada. La señal de entrada no condicionada genera señales eléctricas reproducibles y, en postrera instancia, una respuesta de comportamiento. No se recuerda nada; la información suministrada se limita a transitar por el sistema neural a través de caminos genéticamente establecidos, o sea, "tendidos cual cables de una red eléctrica".

El tañido de una campana, el destello luminoso o un determinado tono acústico, en cuanto estímulos condicionados, generan respuestas eléctricas en tiempo real, distintas de las estereotipadas respuestas eléctricas y de comportamiento desencadenadas por un estímulo no condicionado. En virtud de la asociación temporal de los estímulos condicionados con los no condicionados, los primeros provocan nuevas respuestas eléctricas y de comportamiento. La información suministrada por el estímulo condicionado circula por un nuevo camino, no prestablecido genéticamente, sino formado en el transcurso de la experiencia de aprendizaje. He calificado a ese nuevo camino con el adjetivo "colateral": una vía cuya eficacia funcional se halla determinada por la experiencia de aprendizaje.

La distinción hecha entre circulación de paso y caminos colaterales sugiere otro principio de diseño para un sistema teórico de memoria. La circulación de paso estaría implicada en la representación en tiempo real de los patrones; los caminos colaterales, en la representación de patrones recuperados o recordados. El diseño debe especificar que el peso de la interacción entre elementos en los caminos de circulación de paso sea constante y alto (permitiendo una eficaz transferencia de información) y que el peso de la interacción entre elementos de los caminos colaterales sea inicialmente mínimo (evitando una transferencia de información eficaz) y modificable en función de señales de entrada que guardan sincronía.

Otras características de nuestro diseño teórico provienen de conocimientos clásicos de los sistemas neurales. Así, los agregados sucesivos de neuronas contienen neuronas que reciben señales de gran número de neuronas de agregados precedentes; una red teórica debería contar también con niveles, amén de mostrar convergencia en la transferencia de señales desde los elementos de un nivel hacia los del siguiente. Por último, muchos estudios, incluidos los realizados en el cangrejo de herradura, *Limulus*, y en *Hermissenda* han demostrado que la inhibición sináptica aumenta el contraste entre las señales recibidas. Los límites entre campos de estímulos visuales, por ejemplo, se definen mejor por inhibición entre neuronas vecinas. Por ello, la inhibición entre elementos situados a cierta distancia espacial debería incorporarse a la red teórica.

Utilizando estas y otras propiedades de los sistemas biológicos, mis colegas y yo mismo hemos desarrollado un equipo computerizado que denominamos DYSTAL (abreviación de "DYnamically STable Associative Learning": aprendizaje asociativo dinámicamente estable). Hemos sometido a prueba su capacidad de "aprender" patrones: guardar patrones y reconocerlos posteriormente. Nuestro sistema capta con éxito patrones del tenor de las letras del abecedario y secuencias de letras y, luego, las reconoce aun cuando sólo se le presente parte de los patrones, de forma muy similar a como una persona reconoce un rostro famoso sugerido por los trazos de un boceto.

La red aprendió el patrón, pues no se le programó la relación de entrada y salida. Por contra, muchas redes artificiales no basadas en la arquitectura biológica adquieren un patrón eliminando errores con respecto a una referencia preprogramada denominada a veces "maestro"; el sistema como tal no adquiere nueva información. El número de presentaciones que DYSTAL necesita para adquirir un patrón se acerca bastante a las necesarias para adiestrar a *Hermissenda* o al conejo; las redes que no se fundan en sistemas biológicos precisan miles, si no decenas de miles, de presentaciones para adquirir un patrón.

Quizá la principal característica de DYSTAL, y exclusiva suya, sea su capacidad para acomodar un número creciente de elementos sin demandar del ordenador una potencia inalcanzable. En muchas redes artificiales, cada elemento se halla conectado a todos los demás. Así, cuando el número de elementos aumenta, crece exponencialmente el número de interacciones entre elementos. No hay, en ese sentido, ordenador capaz de realizar el proceso requerido en modelos con más de 100

elementos. En estas redes, aunque se mantuviesen constantes las conexiones entre elementos cuando éstos incrementaran, el tiempo de cómputo requerido para la red no aumentaría linealmente en razón del procedimiento que siguen tales redes para llegar al equilibrio.

Las redes artificiales, no biológicas, alcanzan el equilibrio mediante un ajuste iterativo del peso de todas las conexiones tal, que cada peso cumple un patrón interno de referencia. Es inherente de estos procesos la exigencia de más iteraciones por elemento a medida que se eleva el número de conexiones. En DYSTAL, sin embargo, los pesos de las conexiones no se comparan con un valor fijo; al contrario, se alcanza un equilibrio dinámico en el que aumentos y disminuciones de peso, ante un conjunto de presentaciones de patrones, se igualan y no se producen cambios netos de peso. Igual que ocurre en el almacenamiento permanente de memoria, los cambios de peso pueden convertirse en irreversibles cuando se supera determinado umbral de nivel de peso. Así, pues, los cálculos de DYSTAL requieren menos potencia de ordenador que las redes iterativas, de diseño no biológico.

Se han obtenido ecuaciones que describen el efecto acumulativo de aumentos y disminuciones de peso asociados a patrones de entrada bien definidos. Las implicaciones de esas fórmulas traspasan la capacidad de precálculo de pesos reticulares. Han permitido, por primera vez, calcular las representaciones internas a través de las cuales las redes artificiales guardan recuerdos. Las ecuaciones posibilitarán, algún día, comparar las representaciones internas de redes artificiales con las biológicas. Cotejo que supondrá un avance gigantesco en la comprensión de los sistemas biológicos y en el diseño de los artificiales.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

CALCIUM-MEDIATED REDUCTION OF IONIC CURRENTS: A BIOPHYSICAL MEMORY TRACE. Daniel L. Alkon en *Science*, vol. 226, n.º 4678, págs. 1037-1045; 30 de noviembre de 1984.

A SPATIAL TEMPORAL MODEL OF CELL ACTIVATION. Daniel L. Alkon y Howard Rasmussen en *Science*, vol. 239, n.º 4843, págs. 998-1005, 26 de febrero de 1988.

MEMORY TRACES IN THE BRAIN. Daniel L. Alkon. Cambridge University Press, 1988.

Vidrios de espines

Las propiedades de estos materiales son el resultado de las interacciones magnéticas entre los átomos. Los modelos matemáticos que los describen sirven de prototipo para ciertos problemas de informática, neurología y evolución

Daniel L. Stein

La suciedad se puede barrer y recoger, o se puede esconder debajo de la alfombra, pero antes o después exigirá que se le preste atención. En las ciencias físicas, la "suciedad" puede ser desorden en las estructuras, impurezas en los materiales o conflictos entre interacciones. La suciedad perjudica el orden. Unas cantidades suficientes de distribuciones al azar, imperfecciones e irregularidades pueden destruir las simetrías intrínsecas que simplifican enormemente las descripciones físicas. En la mayor parte de la historia de la física, la suciedad se ha barrido y recogido; los físicos se han dedicado, sobre todo, a investigar los sistemas ordenados; de ese tenor son los cristales perfectos. Sin embargo, desde principios de los setenta, empezaron a prestar atención al estudio del desorden; en otras palabras, los físicos comenzaron a preocuparse por la suciedad que se había ido acumulando en los pasillos de la ciencia. Al principio se trató de añadir una pequeña cantidad de desorden a un cristal perfecto, por ejemplo, con el fin de avanzar en el estudio de los vidrios, unos materiales en los que los átomos están fijos en posiciones aleatorias en el espacio. Estos esfuerzos fracasaron. Pretender excluir todo desorden en sistemas intrínsecamente sucios es intentar estudiar una charca sin lodo.

Entre los empeños más afortunados llevados a cabo para investigar los sistemas desordenados destaca el relativo a los vidrios de espines. La composición de un vidrio de espines no reviste carácter extraordinario —quizás unos pocos átomos de hierro distribuidos en una red de átomos de cobre—, pero sus propiedades magnéticas entrañan una enmarañada complejidad, amén de ser, en ocasiones, del todo impredecibles. El "vidrio" se refiere al desorden en las orientaciones e interacciones de los espines. Los "espines" no son otra cosa que los espines mecánico-cuánticos, responsables de los efectos magnéticos. Un vidrio de espines es, por norma, un sistema sucio. Las técnicas desarrolladas para investigar los vidrios de espines se han aplicado al estudio de problemas complejos en campos muy dispares: ciencia de los ordenadores, neurología, bioquímica y evolución.

DANIEL L. STEIN es profesor de física en la Universidad de Arizona. Realizó sus estudios en la de Brown y en la de Princeton; en esta última recibió su título de doctor en 1979. Fue el primer director de la Escuela de Verano sobre Sistemas Complejos en Santa Fe, en 1988. Ha investigado en el campo de la complejidad de cálculo, los vidrios de espines, los vidrios estructurales y la biofísica.

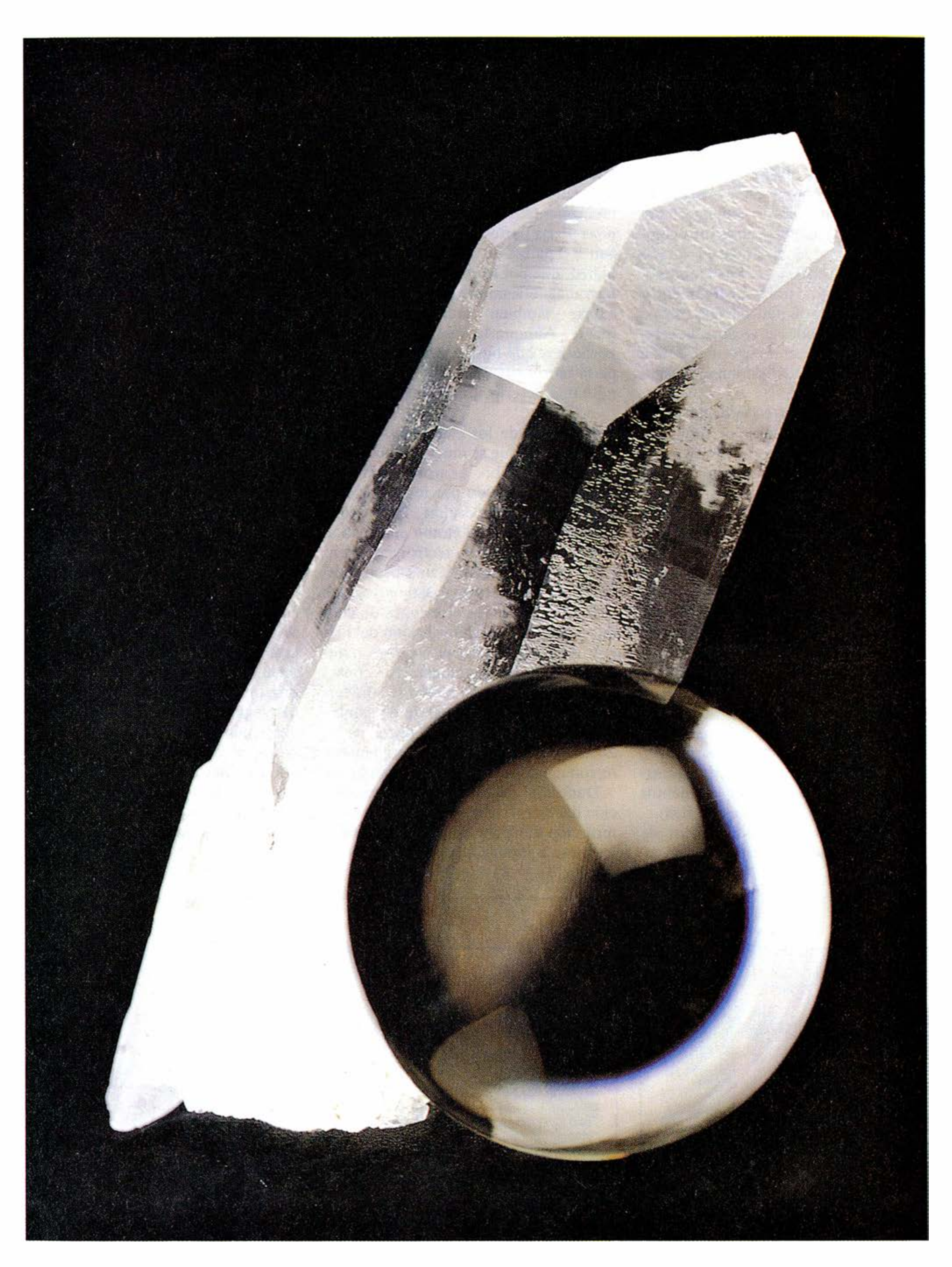
Las características singulares de los vidrios de espines, su dinámica y su complejidad nacen de las interacciones magnéticas que se producen entre sus átomos. Algunos átomos se comportan como si fueran pequeños imanes. Estos átomos originan campos magnéticos y están sujetos a sus efectos. La dirección y la magnitud de tales efectos magnéticos se pueden describir a través del momento magnético, una magnitud vectorial. Cuando un material cuyos átomos se comportan magnéticamente se expone a la acción de un campo magnético externo, los momentos magnéticos tenderán a orientarse en determinada dirección. En algunos materiales, esta orientación de los momentos magnéticos puede tener lugar también como resultado de ciertos efectos internos importantes, asociados con su estructura atómica.

Uno de estos efectos produce la orientación de todos los momentos magnéticos en una misma dirección. Este efecto da cuenta de las propiedades magnéticas intensas del hierro, razón por la cual recibe el nombre de ferromagnetismo, aunque se observa también en el cobalto, el níquel y otros muchos materiales. El ferromagnetismo está relacionado con la naturaleza mecánico-cuántica de los electrones más internos de todos estos metales, lo que provoca que la disposición paralela de los momentos magnéticos de los átomos adyacentes resulte energéticamente favorecida.

En otras palabras, si los momentos magnéticos de dos átomos ferromagnéticos están orientados en una misma dirección, es necesario aportar cierta cantidad de energía para conseguir que uno de estos momentos magnéticos se oriente en dirección opuesta. Por el contrario, si dichos momentos están originalmente orientados en direcciones antagónicas, se produce una liberación de energía cuando los momentos se alinean en idéntica dirección. Por tanto, la energía magnética total de un material tiene un valor mínimo cuando los momentos magnéticos de todos los átomos se orientan en una misma dirección.

La aportación de energía térmica a un material ferromagnético puede condicionar la orientación de los espines. Cuando el hierro puro se calienta a temperaturas elevadas, la energía térmica supera las interacciones ferromagnéticas, de forma tal que la dirección de cada momento magnético cambia al azar de un instante a otro. Una fotografía instantánea de los átomos de hierro pondría de manifiesto que, por término medio, el número de momentos magnéticos dirigidos hacia arriba y abajo, hacia derecha e izquierda, hacia adelante y atrás, es el mismo. El vector suma de todos estos momentos magnéticos, o magnetización resultante, es nulo. (Para ser más precisos, deberíamos matizar que la probabilidad de que se supere este valor cero es muy pequeña.) En esta fase, el hierro se comporta como un material paramagnético.

A medida que la temperatura del hierro disminuye, adquieren predomi-



1. AUNQUE EL CRISTAL Y EL VIDRIO son materiales bastante similares, se trata en realidad de fases estructurales diferentes de la materia. El cristal es un sólido; el vidrio, un líquido muy viscoso. De forma análoga, los vidrios de espines pueden incorporar una orientación permanente de los polos de los átomos magnéticos y constituir una fase única. En opción alternativa, podemos representar un conjunto de átomos cuya orientación cambie con el tiempo.

nio las interacciones entre los momentos magnéticos y los momentos tienden a alinearse en un estado de menor energía. A la temperatura crítica de 771 grados Celsius, la disposición de los átomos cambia de forma repentina y radical y la mayoría de los momentos se alinean en una misma dirección. (La magnetización parece estar ausente en una muestra de hierro ordinario, debido a que ese metal realiza otro complicado proceso que rompe el estado ordenado en dominios. Sin embargo, en cada dominio, todos los momentos magnéticos se orientan en una misma dirección.) Cuando se alcanza la temperatura crítica, el hierro sufre una transición de fase del paramagnetismo al ferromagnetismo.

Ahora bien, en otros tipos de materiales prevalece una clase de orden diferente en los estados de energía más baja. Por ejemplo, los atómos vecinos del cromo tienden a orientar sus momentos magnéticos en direcciones opuestas; si el momento de un átomo se orienta hacia arriba, el momento de otro átomo próximo se orientará hacia abajo. Dado que este comportamiento es el contrario del que se presenta en el hierro, dicha propiedad se conoce con el nombre de antiferromagnetismo. Al igual que en un material ferromagnético, el cromo posee una temperatura crítica en la que se produce el cambio de material paramagnético (disposición al azar de los momentos magnéticos) a material antiferromagnético (disposición de los momentos magnéticos en direcciones opuestas).

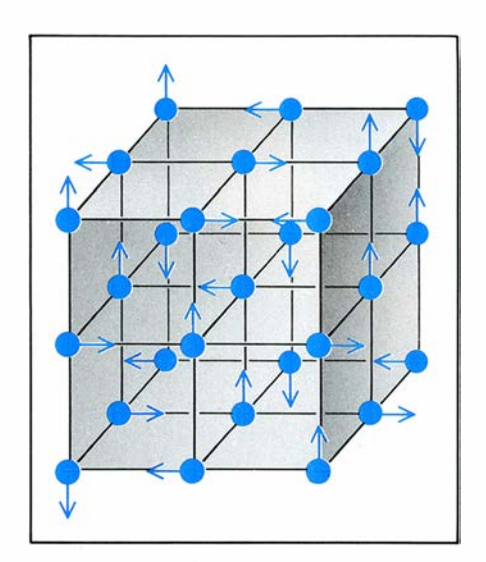
Sorprendentemente, los vidrios de espines presentan propiedades ferromagnéticas y antiferromagnéticas. En un tipo particular de vidrio de espines, se diluye en un metal base no magnético un pequeño número de átomos cuyo momento magnético, o espín, no es nulo. Dos átomos magnéticos adyacentes de esta aleación magnética diluida pueden interaccionar tanto ferromagnéticamente como antiferromagnéticamente. Por ejemplo, cuando unas pocas partes de hierro se mezclan con 100 partes de cobre, los átomos de hierro, que por lo común interaccionan ferromagnéticamente, pueden interaccionar también antiferromagnéticamente. Aunque la explicación de este hecho hay que buscarla en las sutilezas de la teoría cuántica, el fenómeno admite una descripción cualitativa.

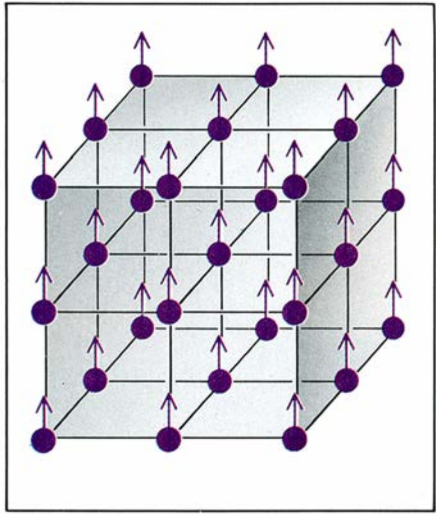
Cada uno de los electrones de conducción que se mueven libremente a través del cobre tiene un espín que resulta influenciado por los átomos de hierro de forma peculiar. Para determinada distancia, el átomo en cuestión alinea el espín de los electrones de conducción paralelamente a su propio espín; para una distancia algo mayor que ésta, el espín de los electrones de conducción es antiparalelo al espín del hierro. Algo más lejos, el espín es paralelo, y así sucesivamente. En consecuencia, el átomo de hierro se convierte en el centro de una serie de esferas concéntricas de influencia decreciente, en las que su efecto es alternativamente ferromagnético y antiferromagnético.

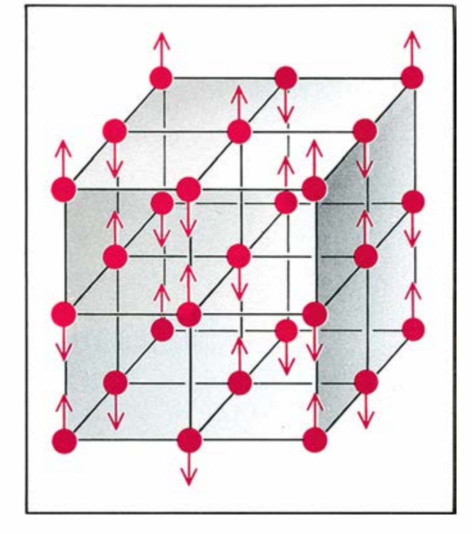
Dado que los electrones de conducción del metal base intervienen en la interacción entre dos átomos magnéticos vecinos, la interacción puede ser ferromagnética o antiferromagnética, según sea la distancia entre dichos átomos. Por tanto, en un vidrio de espines compuesto por muchos átomos de un metal dispersos en una matriz de otro metal, aproximadamente la mitad de todos los pares de átomos interaccionarán ferromagnéticamente y la otra mitad lo harán antiferromagnéticamente. En consecuencia, en la mitad de los casos, la energía magnética de un par de átomos de hierro disminuye si sus espines son paralelos; en los otros casos, dicha energía disminuye si sus espines son antiparalelos.

En virtud de ese comportamiento dual, un átomo de un espín quizá no logre orientarse para satisfacer su interacción con todos los demás átomos del vidrio de espines. Consideremos tres átomos de hierro distribuidos al azar en una red de cobre. El primero interacciona antiferromagnéticamente con el segundo, en tanto que las interacciones entre el primero y el tercero, y entre el segundo y el tercero, son ferromagnéticas. No hay forma de que se cumplan todas estas interacciones a la vez. Por ejemplo, si el espín del primer átomo está dirigido hacia arriba, el del segundo deberá estarlo hacia abajo. El espín del tercer átomo debería orientarse en la misma dirección que el del primero (espín hacia arriba) y que el del segundo (espín hacia abajo). Evidentemente, cualquier disposición violará al menos una de las interacciones. Un sistema cuyas interacciones no se pueden satisfacer de forma simultánea está "frustrado".

Como consecuencia directa de esta frustración, un vidrio de espines posee







2. PARAMAGNETISMO, ferromagnetismo y antiferromagnetismo, en representación esquemática. Los átomos se comportan como si fueran imanes. Cada flecha designa el polo "norte" de un imán. Los átomos de un material paramagnético (*izquierda*) se mueven y sus polos se orientan al azar. En un material ferromagnético (*centro*), todos los polos se orientan en la misma dirección. En un material antiferromagnético (*derecha*), los átomos próximos orientan sus polos en direcciones opuestas. Un vidrio de espines se parece a un material paramagnético congelado: sus polos mantienen una orientación aleatoria.

muchos estados de baja energía. Por ejemplo, si el primero, segundo y tercer átomo de hierro están respectivamente en las configuraciones arriba-abajo-arriba o arriba-abajo-abajo, se encuentra en su estado de energía más baja, debido a que el número de violaciones es lo más bajo posible.

Las implicaciones de la frustración van mucho más allá de la física de los vidrios de espines y se pueden aplicar también a problemas complejos de otros muchos campos. En el caso de los vidrios de espines, la falta de un estado único de baja energía plantea una cuestión importante: ¿son los vidrios de espines una nueva fase de la materia o se trata simplemente de una forma extremadamente "perezosa" de material paramagnético? El cambio de líquido a cristal, o de material paramagnético a ferromagnético, cuando se produce un descenso de temperatura es una transición de fase real: los estados resultantes mantienen un orden distinto en tanto que persista la temperatura. Por otra parte, aunque el vidrio ordinario parezca representar una nueva fase, se asimila fundamentalmente a los líquidos: los vidrios fluyen, aunque lo hacen con una velocidad tan lenta que parecen sólidos.

Los vidrios de espines podrían constituir una fase diferente de la materia, cuyo ordenamiento magnético, u orientación de espines, persistirá en tanto que las bajas temperaturas se mantengan. Por otra parte, los vidrios de espines se pueden considerar materiales paramagnéticos cuyas propiedades dinámicas varían con una velocidad tan baja que parecen constituir una fase estática. Si se observara que los espines de un vidrio de espines mantenido a una temperatura baja cambian de orientación, podría inferirse que se trata de un material paramagnético ordinario. Sin embargo, para que pudiera llevarse a cabo tal observación, sería necesario disponer de un tiempo mayor que la edad del universo.

Una cosa que sí podemos hacer en el laboratorio es buscar pruebas de la transición de fase, es decir, del cambio repentino en las propiedades magnéticas y termodinámicas del vidrio de espines, ante una determinada temperatura crítica. Pero las medidas de diferentes propiedades han proporcionado respuestas contradictorias.

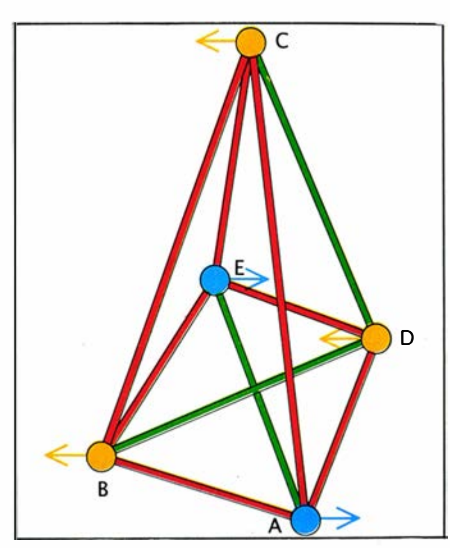
En 1970, Vincent D. Cannella, John A. Mydosh y Joseph I. Budnick, de la Universidad de Fordham, estudiaron las propiedades magnéticas de las aleaciones de hierro y oro. Entre otras cosas, estos autores midieron la susceptibilidad magnética de dichas aleaciones, es decir, el cambio en la magnetización del material que acontece cuando el campo magnético externo varía en una pequeña cuantía. Junto con otros muchos investigadores, éstos hallaron que dicha susceptibilidad experimentaba un cambio muy notable cuando se alcanzaba una temperatura crítica, a medida que el campo magnético se anulaba. Este cambio repentino indicaba la producción de una transición de fase.

Otros experimentos apuntan hacia la conclusión contraria. Cabe esperar que una transición de fase esté caracterizada por un cambio notable en una propiedad termodinámica, el calor específico por ejemplo, es decir, el cambio en la cantidad de calor necesario para elevar la temperatura de determinado material en una cuantía dada. Este cambio importante no se ha observado. En lugar de ello, el calor específico de muchas clases diferentes de vidrios de espines muestra una curva suave y continua, con un máximo para una temperatura que suele ser un 20 por ciento más alta que la temperatura de transición indicada por las medidas de la susceptibilidad magnética.

Por otra parte, ciertos indicios parecen sugerir que las medidas de propiedades magnéticas y térmicas se llevan a cabo durante tiempos demasiado cortos como para permitir que los vidrios de espines reaccionen plenamente a las condiciones cambiantes. En consecuencia, la observación experimental de una transición de fase en los vidrios de espines constituye todavía objeto de debate.

En tanto que los resultados contradictorios atormentan a los experimentadores, los investigadores teóricos se muestran confusos por su falta de familiaridad con la termodinámica de los sistemas desordenados. A lo largo de la pasada década, la mayor parte del trabajo teórico se había llevado a cabo, por razones de simplicidad y facilidad de tratamiento, sobre modelos de vidrios de espines no realistas. A pesar de lo cual, el esfuerzo realizado para interpretar estos modelos sencillos ha proporcionado resultados muy importantes y ha puesto de manifiesto muchas características sorprendentes.

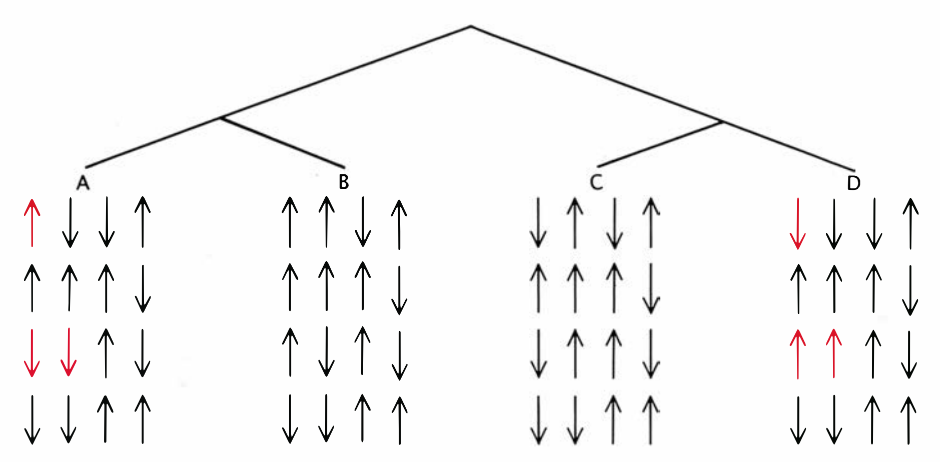
En el año 1975, Sam F. Edwards, de la Universidad de Cambridge, y Philip W. Anderson, de Princeton, introdujeron un modelo de vidrio de espines



3. SE DESARROLLA LA FRUSTRACION en un vidrio de espines cuando las interacciones magnéticas entran en conflicto. En la disposición que se ilustra arriba, las líneas de color verde y rojo representan interacciones que orientan los polos magnéticos en la misma dirección y en direcciones opuestas, respectivamente. Las flechas representan los polos de una disposición que satisface todas las interacciones excepto la que se da entre *B* y *C*. En este caso, no existe ninguna disposición de los polos que se muestre capaz de cumplir todas las interacciones.

de "corto alcance", muy elaborado. En él, los espines se sitúan en los vértices de una red cúbica. Un espín interacciona únicamente con sus vecinos más inmediatos, pero una interacción dada tiene la misma probabilidad de ser ferromagnética que de ser antiferromagnética. Edwards y Anderson asignaron valores numéricos a las interacciones al azar. (Estos números se referían a la intensidad y naturaleza de las interacciones: números positivos para las interacciones ferromagnéticas y, negativos, para las antiferromagnéticas.)

Supongamos que se trace un anillo empezando con una interacción entre un espín y su vecino, continuando hasta una interacción adyacente y siguiendo así, hasta volver al átomo original. Si vamos registrando los valores de las interacciones a lo largo de este anillo y los multiplicamos, la propiedad de frustración se mantiene siempre que el producto sea negativo. Dado que una red típica contiene muchos anillos frustrados, resulta muy difícil determinar, para todos los lugares, aquellos valores del espín que minimizan la energía total del sistema. De hecho, el sistema puede tener muchos estados de baja energía, que quizá no guarden relación entre ellos. Pronto se hizo evidente que los métodos matemáticos existentes no podían poner de manifiesto el comportamiento de baja energía, ni siquiera en el caso de este modelo sencillo.



4. "ARBOL" DE VIDRIOS DE ESPINES, para describir la relación existente entre los estados de baja energía de la solución de Parisi. Superponiendo dos estados y contando los espines orientados en direcciones opuestas, se puede establecer la distancia entre dichos estados. Las flechas decoloreadas demuestran que la distancia entre los estados *A* y *D* vale tres. El primer nivel de este árbol conecta a los estados separados por una distancia de dos; el segundo nivel conecta a los estados separados por una distancia de tres.

Poco después del trabajo de Edwards y Anderson, David Sherrington, del Colegio Imperial de Londres, y Scott Kirkpatrick, del Centro de Investigación Thomas J. Watson de la empresa IBM, propusieron el "modelo de alcance infinito". Supusieron que, por término medio, cada espín interaccionaba con la misma intensidad con todos los restantes espines del sistema. Confiaban en que esta premisa, aunque mucho menos realista, conduciría a un modelo de mejor resolución. El modelo mostraba una transición de fase real, desde una fase paramagnética a una fase de vidrio de espines, en la que los espines quedaban congelados en una disposición al azar permanente. Sin embargo, los intentos realizados para deducir las propiedades de la fase de vidrio de espines resultaron ser mucho más difíciles que lo esperado.

En 1979, Giorgio Parisi, de la Universidad de Roma, obtuvo una solución de la ecuación de Sherrington y Kirkpatrick. La solución todavía no se ha corroborado, aunque las pruebas a favor son sólidas. Sin embargo, cuando se llevó a cabo esta propuesta, resultaba tan rara y diferente de las descripciones anteriores de las fases de la materia, que tuvieron que transcurrir cuatro años antes de que se comprendiera el sentido físico de sus propiedades.

La solución de Parisi demuestra que, por debajo de la temperatura crítica, los vidrios de espines de Sherrington y Kirkpatrick se pueden congelar en alguna de las muchas fases posibles, cada una de las cuales representa un estado de baja energía. Sin embargo, la relación entre estos estados no es una simple transformación de simetría, tal como la inversión de todos los espines. Para pasar de un estado de baja energía a otro, debe invertirse una fracción significativa de todos los espines. El trabajo llevado a cabo, en 1977, por Anderson, David J. Thouless, de la Universidad de Birmingham, y Richard G. Palmer, de la de Princeton, reforzó la idea según la cual, en un modelo a gran escala de los vidrios de espines, pueden existir muchas soluciones no triviales. Esta sorprendente propiedad del modelo de Sherrington y Kirkpatrick adquiere importantes implicaciones en problemas de la ciencia de los ordenadores, la biología y otros campos. Lo veremos más adelante.

Marc Mézard, Nicolas Sourlas y Gérard Toulouse, de la Escuela Normal Superior de Francia, Miguel A. Virasoro, del Instituto Marconi de Roma, y Giorgio Parisi demostraron, en 1984, que estos estados de baja energía presentaban ciertas relaciones entre sí. En particular, los estados se ordenaban de un modo jerárquico, de forma parecida a un árbol genealógico o un diagrama de evolución, basado en las distancias entre ellos. Para determinar la distancia entre los diferentes estados, se debe considerar un mapa que proporciona la orientación de todos los espines en cada uno de aquéllos. Los mapas se superponen en pares; y así, el espín de un estado se puede comparar con un espín en la localización correspondiente del otro estado. Las diferencias de espines entre los dos estados se suman para calcular las distancias buscadas. Los estados de baja energía tienden a agruparse (como lo hacen los hermanos, primos, etcétera), en el árbol mencionado. La obtención de una estructura jerárquica como ésta es muy poco frecuente en los sistemas físicos. La estructura, que muestra algunas reminiscencias de los sistemas biológicos y de otros sistemas similares, podría constituir un rasgo común de muchos sistemas desordenados.

Sin embargo, los estudios recientes de otros modelos de corto alcance más realistas, llevados a cabo por William L. McMillan, de la Universidad de Illinois en Urbana-Champaign, Daniel S. Fisher y David A. Huse, de los laboratorios Bell de la empresa AT&T, y Alan J. Bray y Michael A. Moore, de la Universidad de Manchester, parecen indicar que la estructura jerárquica es una característica patológica del modelo de alcance infinito de Sherrington y Kirkpatrick. Aunque su validez está todavía en discusión, estas nuevas teorías reproducen muchas de las propiedades observadas en los vidrios de espines reales. Tales teorías predicen la existencia de una fase de vidrio de espines a baja temperatura, constituida exclusivamente por los dos estados de energía más baja, y no por todos los estados, como postula el modelo de Sherrington y Kirkpatrick. La explicación de la forma en que los vidrios de espines de corto alcance y de alcance infinito se relacionan con los vidrios de espines reales es un reto importante para los físicos teóricos.

A pesar de la relativa ignorancia sobre la naturaleza de los vidrios de espines, a lo largo de la última década se han hecho esfuerzos muy importantes, y tal vez incluso temerarios, para aplicar cuanto de ello se sabía a algunos problemas clave de la ciencia de los ordenadores, la neurología y la biología. ¿Qué rasgos comparten los vidrios de espines con todos estos problemas? Muchos no se pueden simplificar en otros de sólo algunas variables. Al igual que sucede en los vidrios de espines, estos problemas incluyen múltiples variables que interaccionan entre sí de manera dispar. Como sucede con la frustración en los vidrios de espines, las condiciones en que se acotan esos problemas no pueden satisfacerse habitualmente de forma simultánea. En ello reside la razón por la que la presentan muchas soluciones posibles sin aparente relación mutua.

Los vidrios de espines aportan un marco matemático que recoge estas interesantes propiedades y muchas más. Esa teoría ofrece, pues, un punto de partida natural para los modelos rudimentarios de los sistemas complejos aludidos. La teoría de los vidrios de es-

pines ha permitido simular ciertas propiedades de sistemas que, hasta hoy, resultaban muy difíciles o imposibles de enmarcar en un modelo.

Algunas de las primeras aplicaciones de las matemáticas de los vidrios de espines fueron algoritmos de ordenador para resolver problemas de combinatoria y optimización. Un ejemplo familiar lo encontramos en el del "viajante": ¿cuál es la distancia más corta que un corredor de comercio debe recorrer para visitar un número determinado de ciudades y regresar al lugar de origen? Para hallar la respuesta a esta pregunta, parece evidente que deberemos calcular la distancia entre cada par de ciudades, sumar las distancias para cada una de las combinaciones posibles de pares que completen el recorrido y escoger, entre todas las posibilidades, la combinación más corta. Aunque esta estrategia funciona bien en el caso de que el número de ciudades sea pequeño, las dificultades crecen a partir de ahí. Cuando el número de ciudades aumenta, las posibilidades crecen de forma espectacular.

Si el número de ciudades es cinco, un ordenador podría calcular fácilmente las 12 posibilidades diferentes. Con 10 ciudades, un ordenador todavía podría manejar las 181.440 posibilidades. Ahora bien, para 25 ciudades el número de viajes posibles es tal, que un ordenador capaz de evaluar un millón de posibilidades por segundo necesitaría unos diez mil millones de años, casi dos tercios de la edad del universo, para llevar a cabo los cálculos pertinentes.

Por lo general, los problemas de combinatoria y optimización como el expuesto toman en consideración múltiples variables y requisitos, un número enorme de combinaciones permitidas y una función "coste", que describe todos los valores posibles de la magnitud a optimizar. (En el problema del viajante, la función coste es la distancia recorrida en el desplazamiento expresada en función de las rutas posibles.) En palabras llanas, los problemas de combinatoria y optimización tratan de encontrar la solución que corresponde al menor coste viable.

Para muchos de estos problemas, incluso aquellos en los que el número de variables es muy elevado, la utilización de algoritmos inteligentes permite encontrar el coste más bajo o el valor óptimo "global" en un tiempo bastante corto. Sin embargo, para ciertos tipos de problemas de combinatoria y optimización se reputa imposible diseñar un algoritmo capaz de encontrar la mejor solución en un tiempo razonable para cada fase del problema. Estos problemas "duros de roer" suelen presentar aplicaciones prácticas en lógica, robótica, teoría del lenguaje y almacenamiento y recuperación de datos. No nos sorprendería que alguno de estos problemas difíciles encuentre su solución en la disposición de espines de energía más baja que satisfaga el modelo tridimensional de Edwards y Anderson para un vidrio de espines.

Una estrategia alternativa para abordar los problemas difíciles de combinatoria y optimización consiste en buscar las soluciones "localmente" óptimas. Estas soluciones de coste bajo no pueden mejorarse con pequeñas reestructuraciones de los valores asignados, tal como la inversión de algunos espines, en un vidrio de espines, o reordenando la secuencia en que una persona visita cierto número de ciudades, en el problema del viajante. Aunque nos cueste aceptar la validez de una solución óptima "localmente buena", la alternativa podría ser esperar hasta el siglo próximo, cuando alguien se dedique a calcular la mejor solución por la fuerza bruta, con la ayuda de un ordenador.

Para quienes no deseen fiarlo tan largo, Kirkpatrick, Charles D. Gelatt, Jr., y Mario Vecchi, del centro de investigación de la empresa IBM, han creado un nuevo método de cálculo. Han diseñado el sistema de templado simulado, algoritmo de ordenador capaz de proporcionar soluciones localmente óptimas en tiempos razonablemente cortos. Los métodos físicos que permiten alcanzar un estado de baja energía en un vidrio de espines constituyen la base de este algoritmo.

La energía de un vidrio de espines específico se puede describir en función del estado del sistema, es decir, una determinada disposición de los espines. Si cada espín apunta en una de las dos direcciones posibles (por ejemplo, hacia arriba o hacia abajo), el número total de estados diferentes es igual a dos elevado a la potencia del número total de espines existentes en el sistema considerado. El sistema define si cualquier par de espines interaccionará ferromagnéticamente o antiferromagnéticamente; la energía de un estado en particular dependerá de cuántos espines en dicho estado satisfagan tales interacciones. Si se satisfacen todas, la energía del estado en cuestión será mínima; en caso contrario, su energía superará dicho valor.

La energía en función de todos los estados describe una superficie en un espacio cuya dimensión es igual al número de espines. En lugar de intentar visualizar esta geometría, vamos a suponer que esta función tiene la misma forma que una montaña: la altura de un punto representa la energía del estado correspondiente. Supongamos que el sistema se encuentra en un estado de energía elevada, y visualicemos esta situación imaginando a un atleta montado en una bicicleta y situado en uno de los picos. El objetivo del atleta consiste en encontrar el valle más profundo —es decir, el estado de energía más baja— sin contar con la ayuda de un mapa.

El atleta empieza a descender por la ladera de la montaña hasta que llega a un valle próximo. Un tanto escéptico acerca de su suerte en encontrar el valle más profundo de todos al primer intento, el ciclista pedalea para salir de este valle, alcanza un paso entre las montañas y desciende hasta un nuevo valle más hondo que el anterior. Después de pedalear a lo largo de muchos valles y muchas montañas, el atleta cree que al final de su recorrido ha encontrado el valle más profundo, aunque no puede estar completamente seguro de ello, dado que todavía existen muchos valles sin explorar.

La búsqueda en un estado de baja energía en un vidrio de espines requiere una serie sucesiva de calentamientos y enfriamientos —proceso de templado—, en una secuencia parecida a la realizada por el ciclista ascendiendo y descendiendo por las montañas. Si la temperatura es extremadamente baja, el sistema permanecerá en un valle durante un tiempo muy largo, aunque este valle sea poco profundo. A medida que la temperatura asciende, el sistema dispone de una energía mayor para continuar la exploración, utilizando el símil citado. Sus espines se pueden invertir más fácilmente y, por tanto, su probabilidad de escapar de los valles poco profundos es mayor, lo cual le permite intentar muchas más configuraciones de espín posibles, algunas de las cuales pueden tener una energía inferior a la del estado inicial.

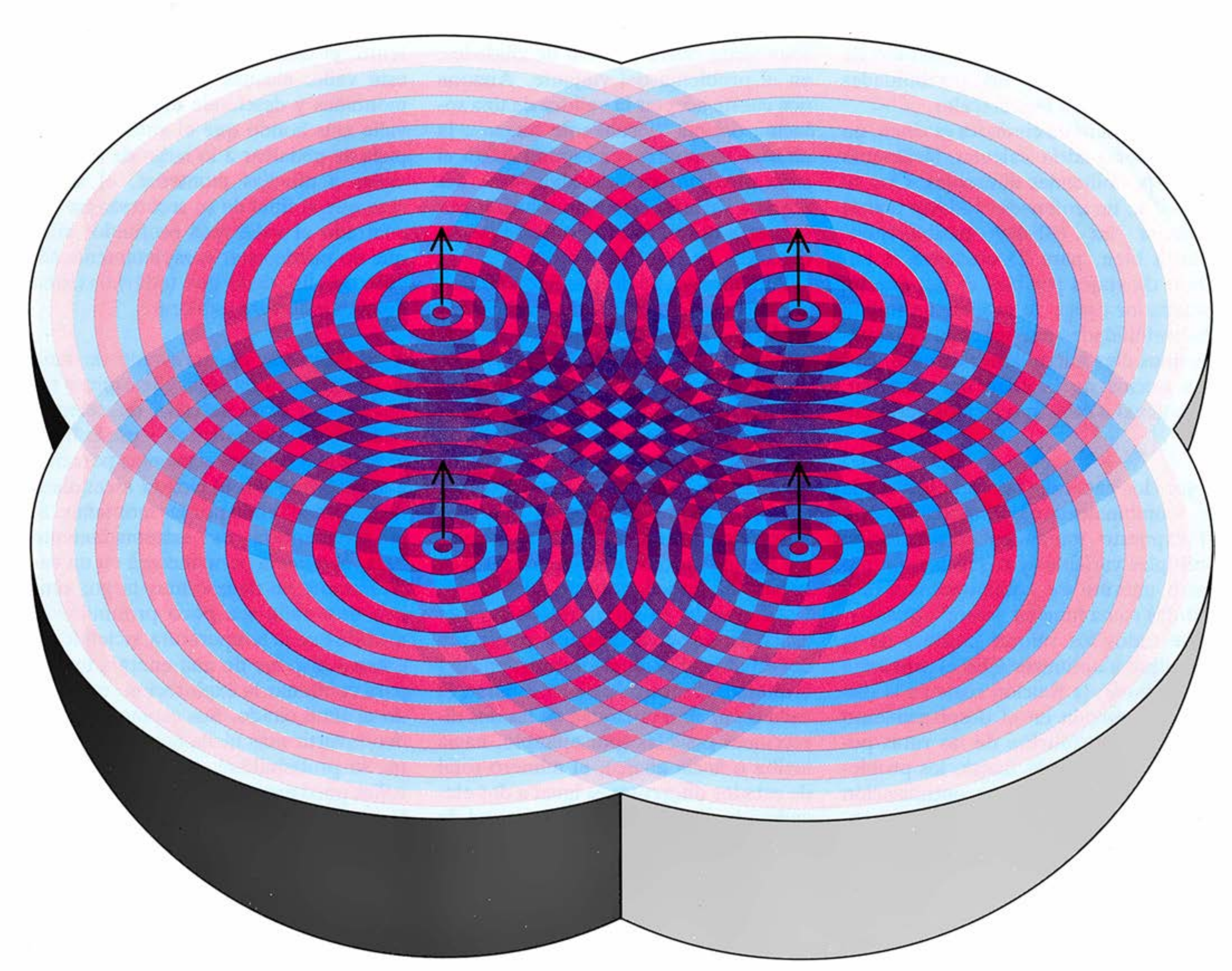
En consecuencia, un algoritmo muy simple para encontrar un estado de energía relativamente baja de un vidrio de espines consistirá en simular una temperatura elevada (con el fin de que el sistema pueda, en principio, intentar

cualquier estado) y, a partir de aquí, enfriar lentamente dicho sistema para llegar a los estados de energía más baja. Si, en una fase inicial del proceso, se llega a un valle alto, habrá todavía una probabilidad elevada de escapar de allí por algún paso cercano y buscar otro valle más profundo (es decir, de energía más baja). Tras muchos ciclos de calentamiento y enfriamiento, el algoritmo posee una alta probabilidad de proporcionar una solución satisfactoria, aunque la probabilidad de encontrar accidentalmente la mejor solución en tan amplio espacio sea mínima.

En muchos problemas de combinatoria y optimización, la función coste recuerda el paisaje accidentado en un espacio de estados, de forma similar a lo que sucede con la función de energía en un vidrio de espines. Los algoritmos de templado simulado abordan los problemas de combinatoria y optimización de manera análoga a como lo hace el problema de encontrar la solución de energía más baja en los vidrios de espines. La función coste considera la energía una función de estado. Aunque la temperatura en estos problemas carece de significado físico, puede aumentar o disminuir, como si se tratara de la temperatura en un problema físico, con el fin de que el sistema pueda explorar todas las regiones del espacio de estados en la búsqueda de una buena solución. Procediendo así, los algoritmos de templado simulado ofrecen soluciones de bajo coste en tiempos bastante breves, para una amplia serie de problemas combinatorios y de optimización.

A principios de nuestra década, John J. Hopfield, de la AT&T y del Instituto de Tecnología de California, propuso otra aplicación importante de las matemáticas de los vidrios de espines. Advirtió que un sistema similar a los vidrios de espines podría llevar a cabo cálculos y almacenar información, siempre que cumpliera las reglas dinámicas apropiadas. Este sistema revestía especial interés por cuanto simulaba la arquitectura del cerebro con más aproximación que los ordenadores digitales ordinarios [véase "Computación conjunta en circuitos neuromorfos", por David W. Tank y John J. Hopfield; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, febrero de 1988].

El modelo de Hopfield está formado por simples "neuronas", cada una de las cuales puede hallarse en uno de los dos estados siguientes: encendida (funcionando) o apagada (sin funcionar). Que una neurona permanezca en su estado actual o cambie depende de los estados de todas las neuronas conectadas con ella. La naturaleza del trabajo de



5. VIDRIOS DE ESPINES, que se obtienen cuando los átomos interaccionan con los electrones de conducción. Cada flecha se orienta en la dirección del polo "norte" de un átomo. Cada átomo está, a su vez, situado en el centro de una sucesión de esferas concéntricas de influencia decreciente, en las que los polos de los electrones que rodean al átomo se orientan de manera alternativa hacia el sur (*color rojo*) y hacia el norte (*azul*). La presencia de los electrones afecta a las interacciones que tienen lugar entre los átomos, cuyos polos se pueden invertir en presencia de otros átomos y de los electrones que los rodean.

cálculo determinará la red de conexiones nerviosas a utilizar. Al contrario de lo que sucede con las neuronas reales, las del modelo de Hopfield interaccionan simétricamente: el efecto de una neurona sobre otra es el mismo que el efecto recíproco.

En ciertos aspectos, este sistema se parece a los vidrios de espines: posee un conjunto de variables —cada una de las cuales puede tomar dos valores— que interaccionan entre sí de manera compleja y no uniforme. Las diferencias cruciales existentes entre estos dos sistemas radican en la forma en que se escoge la distribución de probabilidad de las interacciones del modelo neuronal y en la evolución posible de las interacciones con el tiempo, lo cual facilita que se produzca un proceso de "aprendizaje".

Se puede definir para este sistema una función de energía dependiente del estado, lo mismo que se hacía para los vidrios de espines. Según vimos, el resultado es un paisaje montañoso accidentado en el espacio de estados. Los valles de energía podrían corresponder a las memorias que deben recordarse, a las imágenes que deben reconocerse o a otros tipos de comportamiento mental. Las conexiones nerviosas del sistema establecen el número, la localización y el significado de los valles.

Un estímulo del mundo externo determina la localización inicial del sistema en el espacio de estados, es decir, las neuronas que están excitadas y las que se hallan inactivas. Una zona de atracción rodea el punto más bajo de un valle: aquí yace la "solución". Si el sistema se encuentra en algún lugar de esta zona, evolucionará hacia la solución asociada con el problema propuesto. Por consiguiente, las entradas procedentes del mundo externo iniciarán la selección de una solución y recuperarán, por ejemplo, un recuerdo determinado.

Este tipo de sistema difiere bastante de los algoritmos lineales y secuenciales utilizados en los ordenadores digitales. Al igual que los que controlan el sistema nervioso de un animal, los cálculos utilizados en este caso son de naturaleza colectiva, es decir, todas las partes del sistema interaccionan entre sí simultáneamente y muchas de ellas cambian de estado a medida que el cálculo avanza.

En otra conexión entre las matemáticas de los vidrios de espines y la biología, los investigadores han encontrado una relación muy interesante con la evolución biológica. Una de las cuestiones fundamentales de la primitiva evolución consiste en averiguar la forma en que una "sopa" de moléculas, pensemos en los aminoácidos o los ácidos nucleicos, evoluciona para dar lugar a macromoléculas altamente organizadas y portadoras de información: las proteínas o el ADN. La química exacta de este proceso se desconoce. En cualquier caso, se puede construir un modelo matemático de evolución molecular en el que se produzca una transición interesante desde un estado con poca "información" hacia otro con mucha "información".

Decimos que la información biológica contenida en una secuencia de monómeros (los bloques que constituyen las macromoléculas o polímeros) es valiosa si ayuda a la supervivencia del polímero. Antes de que exista un aparato celular complicado para convertir las secuencias de ADN en proteínas funcionales, la probabilidad de supervivencia de un polímero puede guardar una relación directa con las propiedades químicas de la secuencia real: facilidad de réplica, características de simetría, probabilidad de absorción sobre una superficie próxima, tendencia a la asociación, estabilidad, etcétera.

A principios de los ochenta, Daniel S. Rokhsar, de la Universidad de Princeton, Anderson y el autor consideraron dos monómeros, X e Y, que, en principio, podían representar dos moléculas de interés biológico cualesquiera. Los dos monómeros están mezclados a partes iguales. Se impone una secuencia de sucesos sobre este sistema, construyendo anillos de monómeros, cada vez más largos a medida que el tiempo transcurre. La clave para generar un gran contenido de información descansa en un proceso caracterizado por la diversidad y la selección. La diversidad significa que es posible un gran número de polímeros diferentes como salidas de esta secuencia de sucesos. Por ejemplo, si un enlace X-Y es mucho más estable que los enlaces X-X o Y-Y, el proceso de crecimiento proporcionará siempre polímeros X,Y, X,Y, X,Y y así sucesivamente, y no se puede deducir ninguna información de este proceso. Por otro lado, la selección significa que no todos los polímeros tienen una misma probabilidad de formación o supervivencia. Si un sistema genera cualquier tipo posible de polímero, tampoco se gana nada. El contenido de información de este sistema se puede definir simplemente por el logaritmo del número de polímeros posibles dividido por el número de polímeros existentes.

Para crear tanto diversidad como selección, el autor y sus colegas estudiaron un modelo bastante abstracto en el que la interacción entre dos monómeros cualesquiera de una cadena presentaba aproximadamente la misma probabilidad de aumentar o disminuir la probabilidad de supervivencia de la secuencia. Para una cadena dada, la probabilidad total de supervivencia por unidad de tiempo era igual a la suma de las contribuciones de cada par. Se puede construir un modelo matemático que dé cuenta de todos estos factores estadísticamente. La matemática de este modelo es muy similar a la de los vidrios de espines.

Al igual que en la función de estado de los vidrios de espines, la función de probabilidad de supervivencia tiene muchos picos y valles en el espacio de estados de todos los polímeros del modelo. El modelo demuestra que no todos los polímeros gozan de idéntica probabilidad (lo cual parece bastante realista). Por otro lado, mientras el número de polímeros "buenos" aumenta exponencialmente con el tamaño del polímero, se mantiene una diversidad suficiente para generar información.

Cualquiera que sea su futuro, todos estos ensayos han ayudado a estimular los avances en disciplinas tan dispares como física, matemáticas, informática, biología, química y economía. Un número creciente de investigadores se está ocupando actualmente de los problemas fundamentales relacionados con la incertidumbre y el desorden existentes en nuestro universo. Hemos empezado a desarrollar un conocimiento más profundo de los motivos por los que todos estos sistemas se resisten a un tratamiento matemático y, de este modo, podremos llegar a comprenderlos mejor en sus propios términos. Estamos comenzando a remangarnos y a ensuciarnos las manos.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

SPIN GLASS THEORY AND BEYOND. M. Mézard, G. Parisi y M. A. Virasoro. World Scientific Publications, Singapore, 1986.

SPIN GLASSES AND OTHER FRUSTRATED SYSTEMS. D. Chowdhury. World Scientific Publications, Singapore, 1986.

COMPLEX SYSTEMS. Dirigido por D. L. Stein, Addison-Wesley Publishing Company, en prensa.

ORIGINS OF ORDER: SELF-ORGANIZATION AND SELECTION IN EVOLUTION. S. A. Kauffman. Oxford University Press, en prensa.

Ciencia y sociedad

Surfing de fotones

Imaginémonos un buque que avanza por una bahía tranquila. En la orilla cercana, un deportista aficionado a la navegación en tabla ("surfing") busca la mejor ola que remontar. Con las manos rema hasta situarse en la estela del barco, caza una de las ondas provocadas por éste y cabalga cruzando la ensenada.

La práctica de ese deporte en la estela ilustra las nuevas ideas que yacen bajo la propuesta de convertir pulsos cortos de luz láser en ráfagas intensas y focalizadas de radiación X. La técnica resultante, concebida por Scott C. Wilks y John M. Dawson, de la Universidad de California en Los Angeles, puede convertirse en una opción más eficaz y potente que los láseres de rayos X y de electrones libres. Entraña dirigir un haz de partículas hacia un mar de electrones, generando así una estela vigorosa que podría impulsar fotones hacia energías características de los rayos X.

Para crear el mar de electrones, se calienta un gas, encerrado quizás en una cámara espaciosa, a la temperatura en que los electrones saltan de los núcleos atómicos, y se obtiene un estado al que llamamos plasma. Se dirige entonces hacia el mismo un haz de partículas con velocidades próximas a la de la luz; una onda de electrones lo sigue en su estela. Podemos imaginar esa onda electrónica como una pared de carga negativa que se mueve en la misma dirección y velocidad que el haz.

De acuerdo con Wilks y Dawson, tras el haz de partículas y delante de la pared de carga negativa, se envía hacia el plasma un pulso de luz láser dotado de cierta frecuencia. El pulso del láser se mueve por el plasma como lo haría un paquete de fotones. La pared de carga negativa impele a los fotones; es decir, éstos absorben, de una forma regular, energía de la onda del plasma. Así, opinan los expertos, se aceleran los fotones y ganan energía saliendo del plasma como una ráfaga de radiación de altas energías.

Wilks, Dawson y sus colegas han publicado en la revista *Physical Review Letters* los resultados de su simulación mediante computador de su acelerador de fotones. Considerado el estado actual de las técnicas del láser y del plasma, los investigadores predicen que semejante acelerador incrementaría la energía de un fotón en un factor 10 transformando luz violeta en rayos X. Afirman que, alargando el tiempo durante el cual los fotones interaccionan con el plasma, podría agrandarse la energía de los fotones en un factor mayor. En teoría, el acelerador ha de transferir energía a los fotones de modo más eficaz que los láseres de electrones libres y de rayos X. El acelerador de fotones podría generar radiación susceptible de aplicación en armamento, cirugía o fusión nuclear.

Para realizar las primeras pruebas de este acelerador de fotones, los investigadores proyectan adaptar un dispositivo acelerador de electrones en plasma [véase "Aceleradores de partículas de plasma", por John M. Dawson; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, mayo de 1989]. El deporte se practica de nuevo en la costa de California y los próximos meses nos dirán si en este caso los físicos pueden coger la onda.

Litio para un universo abierto

Las corrientes cosmológicas actuales necesitan un universo plano, fruto del balance entre un universo condenado a recolapsarse y otro destinado a la expansión sin fin. No parece, sin embargo, que al cosmos le inquieten esas componendas teóricas. En un artículo que acaba de salir en *Physical Review Letters*, firmado por un equipo de la Universidad de Yale, se ofrece la última prueba en favor de la expansión indefinida y que apoya también la idea según la cual la mayor parte de la masa del universo está oculta en partículas exóticas y sin detectar.

Durante décadas, los cosmólogos han tenido casi la certeza de que el deuterio, el helio y el litio-7 (^{7}Li), entre otros isótopos ligeros, se sintetizaron a lo largo de los primeros minutos subsiguientes a la gran explosión. La cantidad de esos isótopos producidos en la nucleosíntesis cósmica depende decisivamente de la densidad de bariones (neutrones y protones) del universo en aquel momento. Todos los estudios teóricos sobre nucleosíntesis muestran que, para que se produjeran las concentraciones observadas de helio y deuterio, la densidad bariónica debía ser mucho menor que la densidad crítica, densidad necesaria para pasar de un universo abierto (en expansión indefinida) a uno cerrado (abocado al colapso).

En línea de principio, podemos emplear el ^{7}Li para determinar la densidad bariónica, aunque su abundancia es mínima, comparada con la de otros isótopos. En términos experimentales, explica cuán difícil sea su observación; y, desde la óptica teórica, significa que la concentración de ^{7}Li es particularmente sensible a errores en las velocidades de reacción nuclear conocidas.

El planteamiento seguido por los investigadores de Yale se aleja bastante de lo acostumbrado, pues no parten de la nucleosíntesis, sino de la evolución estelar. En 1982 François y Monique Spite observaron que la concentración de litio en las estrellas más viejas de la galaxia tendía hacia un valor constante. Conjeturaron que ese valor correspondía a la abundancia estelar primitiva, dejando aparte la nucleosíntesis cósmica.

La primera providencia del equipo de Yale fue servirse de algunos de los más refinados modelos de evolución estelar existentes para recuperar la cantidad inicial de litio. Confirmaron la predicción de los Spite: el litio de las estrellas más antiguas se aproximaba asintóticamente a una constante, la supuesta abundancia inicial.

El siguiente paso consistió en comprobar qué densidad bariónica producía ese valor en un cálculo de la nucleosíntesis. También aquí el procedimiento usado resultaba peculiar. Considerando que la concentración de litio es sensible a los diversos parámetros que aparecen en las velocidades de reacción, el grupo de Yale varió los parámetros al azar según el método de Monte Carlo. El resultado, afirma Lawrence M. Krauss, uno de los investigadores, "es probablemente el primer cálculo de nucleosíntesis con límites de confianza estadística".

¿Qué se encontró? Los resultados dependen del valor atribuido a la constante de Hubble, que mide el ritmo de expansión del universo. Si se elige 50, cifra que aceptarían muchos astrónomos, el límite inferior de dos desviaciones típicas en la densidad bariónica del universo está a un 2 por ciento de la densidad crítica y el límite superior queda cerca de un 10 por ciento.

Estos números, que no constituyen ninguna novedad, corroboran viejas hipótesis de acuerdo con las cuales no podía defenderse un universo con el único aval de los bariones. Los teóricos que creen en un universo plano habrán de recurrir, una vez más, a la materia no bariónica para resolver su problema.

La mañana después

Algunos meses después, la posibilidad de obtener energía mediante fusión fría parece habérsela llevado el viento. Centenares de investigadores, ni uno menos, no han conseguido confirmar el sorprendente resultado anunciado el pasado mes de marzo en la Universidad de Utah por Martin Fleischmann y B. Stanley Pons: generación de calor por fusión nuclear a temperatura ambiente. Este resultado, de ser cierto, podría conducir a una inagotable fuente de energía limpia. Fleischmann y Pons decían haber conseguido la fusión nuclear al hacer pasar corriente eléctrica por agua pesada usando un cátodo de paladio: en sus aparatos se produjo calor procedente de la fusión de los átomos de hidrógeno pesados que la corriente introduce en el paladio. Sin embargo, a pesar de que algunos investigadores consideran haber detectado una producción de calor inexplicable, el efecto se muestra sutilmente escurridizo y no hay pruebas contundentes de que sea la fusión la responsable del fenómeno.

Aparte de calor, deberían generarse subproductos del tipo del helio o tritio (isótopo del hidrógeno todavía más pesado). Cabría detectar también abundante emisión de neutrones, que producirían rayos gamma. Ningún experimento ha mostrado de una forma convincente esas señales, aunque Nathan S. Lewis, del Instituto de Tecnología de California, uno de los más escépticos, informa que ha encontrado efectos químicos que podrían inducir a engaño a los más precipitados. Ningún grupo, opina, ha verificado los hechos fundamentales que el grupo de Utah dice haber encontrado.

Entre los pocos investigadores que continúan creyendo en la anómala producción de calor se encuentra Robert A. Huggins y sus colegas, de la Universidad de Stanford, amén de otros grupos de la Universidad de Texas A&M. Según Huggins, la mayoría de los científicos estan "perdiendo el tiempo" porque emplean corrientes demasiado débiles. El no ha buscado todavía neutrones ni otros productos de la fusión.

A. John Appleby, de la Universidad de Texas A&M, asegura que no se han eliminado todas las posibles explicaciones basadas en un fenómeno químico trivial, si bien ese momento está cada vez más cerca. En sus experimentos microcalorímetros parece que se ha detectado calor en exceso, aunque fracasara la detección de helio. Varios laboratorios han confirmado la presencia de cantidades anómalas de tritio en el agua pesada en los experimentos realizados por Kevin L. Wolf, del mismo centro superior, quien señala haber detectado la emisión de neutrones, aunque en una tasa muy pequeña. Wolf cree que debe refundirse el paladio muchas veces para eliminar todos los restos de hidrógeno ordinario que "envenenan" el sistema. "Estamos seguros de que es tritio", declara Wolf. "El único cabo suelto es saber quién lo ha puesto ahí."

La mayoría de los investigadores sospechan que la respuesta reside en la contaminación. Ni siquiera Fleischmann y Pons pretenden haber detectado producción de neutrones y de helio 4 en sus experimentos, observaciones que en su momento ofrecieron como prueba de la fusión. Richard D. Petrasso y otros colegas, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, han criticado las mediciones de rayos gamma de Fleischmann y Pons que se presentaron en favor de la emisión de neutrones con la energía que precisamente se esperaba de la fusión. Las objeciones de Petrasso apuntan en el sentido de que la señal de rayos gamma era una radiación que aparecía realmente a una energía claramente distinta. Las críticas cosechadas por Fleischmann y Pons arreciaron cuando el Laboratorio Nacional de Los Alamos anunció en junio que renunciaba a llevar a cabo el trabajo conjunto con los investigadores de la Universidad de Utah porque ésta se desdijo de su compromiso.

A pesar del escepticismo creciente en torno a la fusión fría como una fuente de energía, otra pretensión, ésta de Steven E. Jones, de la Universidad Brigham Young, de haber detectado fusión aunque a un nivel extremadamente pequeño en un experimento parecido en algo al de Fleischmann y Pons ha recibido cierta confirmación. "El exceso de calor que Fleischmann y Pons aducen haber detectado, opina Jones, puede decirse, casi con absoluta certeza, que no se debe a la fusión." Para él, la fusión fría se reduce a unas cuantas fusiones por minuto, que no generan apenas calor detectable, aunque sí producen un pequeño flujo de neutrones. La opinión de Jones se ha visto refrendada, por lo que parece, con los trabajos de Howard O. Menlove y sus colegas de Los Alamos y con las investigaciones realizadas en la Universidad de Bolonia. Menlove y Jones creen que han observado una producción de neutrones estadísticamente significativa al replicar sus experimentos en Los Alamos.

Menlove asegura que, en un experimento realizado por F. Scaramuzzi en el Centro de Investigación de la Energía en Frascati, se ha detectado la emisión de neutrones solitarios y ráfagas de cientos de neutrones. Se sometió el hidrógeno pesado a grandes presiones en finas capas de titanio, realizando un cambio periódico de la temperatura.

Pero tampoco la fusión fría de ritmo lento se acepta unánimemente. Moshe Gai, de la Universidad de Yale, afirma que, en su réplica del experimento de Jones, no se han producido ni tan sólo niveles bajos de neutrones. Norman Hackerman, presidente emérito de la Universidad de Rice, y J. Robert Schrieffer, de la Universidad de California en Santa Bárbara, ambos co-presidentes de la conferencia financiada con fondos gubernamentales sobre la fusión fría que tuvo lugar en Santa Fe, consideran que la pretensión de Jones de haber obtenido fusión, eso sí, a un ritmo muy pequeño, merece un crédito "moderado". Schrieffer, premio Nobel de física e influyente consejero del gobierno sobre estos temas, está de acuerdo con Hackerman en que las pruebas de la producción anómala de calor "son muy débiles". Hackerman recuerda que quienes sostienen haber detectado calor no siempre son capaces de reproducir dicho efecto.

Hundimiento laminar

Cuando una de las placas de la superficie de la Tierra alcanza el final de su vida geológica se dobla a lo largo de una zona lineal de subducción y se hunde laminarmente en el manto. Pero cuando asciende material caliente del manto, capa de 3000 kilómetros de potencia de rocas sólidas y dúctiles que se sitúa entre la corteza y el núcleo metálico, lo hace en forma de pluma o penacho. ¿Por qué el descenso de material en el manto difiere tanto del ascenso a partir del mismo?

Un modelo del manto elaborado por ordenador indica que las capas subsidentes y los penachos ascendentes son consecuencia natural de la forma esférica del manto. El modelo, desarrollado por Dave Bercovici y Gerard Schubert, de la Universidad de California en Los Angeles, y Gary A. Glatzmaier, del Laboratorio Nacional de Los Alamos, intenta reproducir la circulación convectiva del manto. El motor de los procesos convectivos es el calor procedente del núcleo y de las desintegraciones de elementos radiactivos del manto: las rocas calientes ascienden en virtud del empuje de Arquímedes y se someten a una circulación horizontal, provocando con ello el movimiento de las placas de superficie, hasta que se enfrían y se hunden en una zona de subducción.

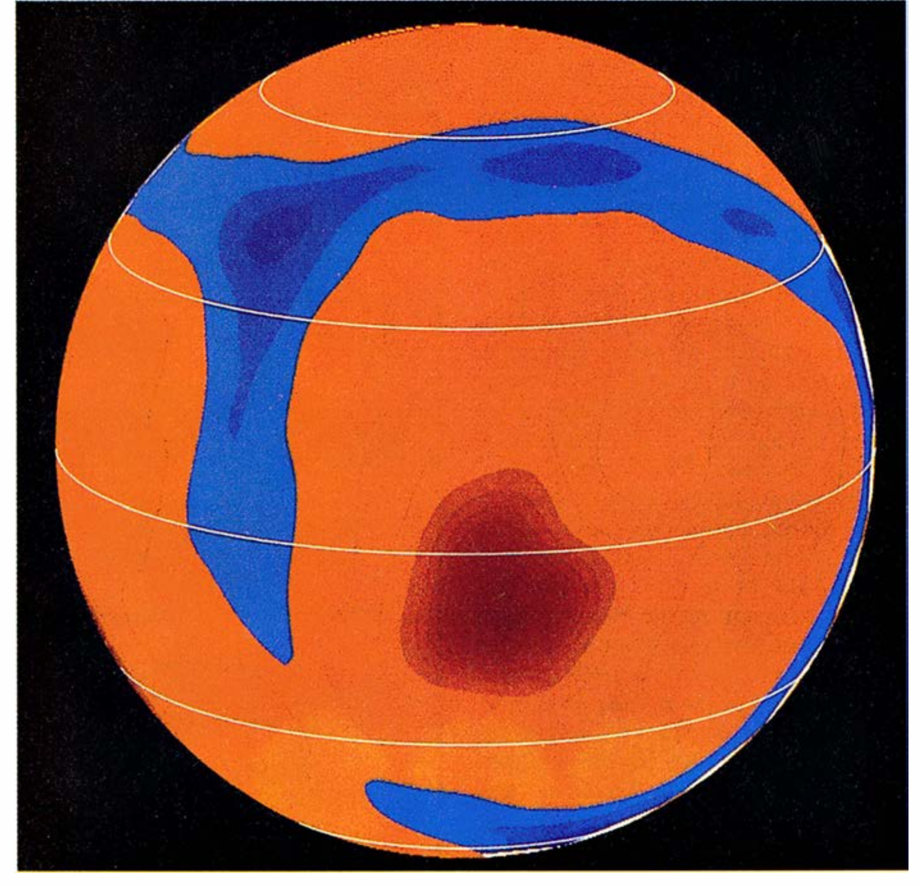
Se ha supuesto que la morfología de estas regiones refleja la rigidez de las placas de superficie, que les obligaría a doblarse a lo largo de una línea y conservar su configuración laminar durante la subsidencia. Los resultados del modelo, publicados en la revista *Science*, sugieren que este descenso se produciría de idéntico modo aun cuando las placas no fueran rígidas.

Todos los esfuerzos realizados con anterioridad para someter a modelo la convección del manto no lograban desentrañar la geometría de los flujos, debido a que, obsesionados por la simplicidad, se reducía el manto a una caja plana o a un plano vertical único. Esos modelos solían admitir, además, una densidad de las rocas uniforme, en vez de suponer una densidad creciente con la profundidad. Bercovici y sus colegas, al explotar la potencia de los superordenadores y apoyándose en un modelo anterior desarrollado por Glatzmaier para estudiar la convección en las capas externas del Sol, construyeron un modelo matemático que simulaba la convección en una capa esférica de tres dimensiones con una estratificación de densidades similar a la que presenta el manto real. (Otro modelo desarrollado antes por John Baumgardner, de Los Alamos, había estudiado también la convección del manto en una capa esférica.)

A pesar de lo cual, el modelo seguía pecando de excesiva simplificación: carecía de capa superficial de placas rígidas, suponía la convección menos activa de lo que en realidad se da en el manto y consideraba que la viscosidad de las rocas era constante, cuando, sabido es, la viscosidad varía allí radial y lateralmente. Además, al desconocerse qué proporción relativa guardan el calor que fluye hacia el manto procedente del núcleo con el generado en el interior del manto, los investigadores supusieron distintos valores de esta proporción obteniendo otras tantas versiones del modelo. Observaron una persistente regularidad en el hundimiento de las capas frías hacia la base de la capa convectiva y en el ascenso por medio de penachos calientes.

Los datos sísmicos confirman que esa estructura laminar se conserva hasta grandes profundidades de las zonas de subducción, aspecto que, según los autores, es difícil de explicar únicamente con la rigidez de las placas. Los datos geofísicos corroboran también la idea según la cual los afloramientos se producen sólo en forma de plumas o penachos. Aunque el material del manto suba en forma laminar en las cordilleras centro-oceánicas —"rifts" lineales que se abren entre placas divergentes—, el material caliente y lento, en términos sísmicos, parece originarse cerca de la superficie, brotando en respuesta pasiva ante la divergencia de las placas. Los penachos profundos bien asentados, como los que subyacen a los "puntos calientes" de Hawai y de Islandia, parecen corresponder a la forma normal de afloramiento.

¿Por qué esta estructura de láminas subsidentes y penachos ascendentes resulta naturalmente de la convección en una capa esférica? Bercovici y sus colegas están analizando sus datos en busca de la respuesta adecuada. Esperan también pergeñar modelos más verosímiles que introduzcan la viscosidad variable del manto. Tales modelos podrían reproducir, además, otros aspectos de la tectónica de placas, quizás incluso la coreografía de las propias placas.



MODELO DE ORDENADOR que representa el flujo radial del manto, entendido como una capa esférica de fluido sometida a la convección. En la ilustración del flujo aparecen capas que se hunden (azul) y subidas de material en penachos (rojo). Gary A. Glatzmaier nos ha cedido la imagen con cuyo permiso la reproducimos

Ciencia y empresa

La era del diamante

La empresa General Electric ha venido trabajando con diamantes durante años. No hace mucho, un asesor científico lanzaba el reto a los investigadores de otra compañía estadounidense, General Motors, y les cuestionaba su capacidad de crear películas finas de diamante a escala industrial. Por si fuera poco, en un tercer emporio, Martin Marietta, eran las propias divisiones de fabricación las que solicitaban un plan de investigación de película fina de diamante.

Lo cierto es que los empresarios del Japón, y más recientemente los norteamericanos, se han puesto a cultivar película fina de diamante, espoleados por la promesa de aplicaciones espectaculares: recubrimientos de herramientas, superficies de cojinetes resistentes al calor y la corrosión, ventanas reforzadas, sumideros de calor para equipos electrónicos y, andando el tiempo, componentes electrónicos de alta velocidad. "A plazo no muy largo, los diamantes pueden adquirir más importancia que los superconductores de altas temperaturas", asegura William F. Benholzer, del centro de investigación y desarrollo de la compañía General Electric.

¿Por qué? El diamante puro goza de una atractiva gama de propiedades. Un excepcional número de enlaces muy fuertes que ligan los átomos de carbono que constituyen el diamante, convierte a éste en el más duro de los materiales conocidos. El diamante, que quintuplica la velocidad con que el cobre conduce el calor a temperatura ambiente, posee un coeficiente de rozamiento similar al del teflón. Además, es virtualmente transparente a las longitudes de onda que van del ultravioleta al infrarojo lejano, propaga el sonido a gran velocidad y opone resistencia a la mayoría de agentes químicos.

Sin embargo, su propia dureza lo hace difícil de adaptar a las necesidades de la industria. Desde los años cincuenta, la General Electric y otras empresas han venido fabricando diamantes sintéticos sometiendo el grafito a altas temperaturas y presiones; el material resultante encuentra sus mejores aplicaciones en abrasivos y herramientas de corte.

Dos décadas después, los ingenieros soviéticos lograban cultivar finas películas de diamante a bajas presiones y sobre substratos distintos de ese mineral. El interés de Occidente por las películas de diamante cobró especial impulso hace un lustro, ante los sólidos programas que venían desarrollándose en el Japón.

Se usan varias técnicas de sublimación de vapores químicos para crear películas de diamante. Por lo común, se convierte en plasma una mezcla de metano e hidrógeno sobre un substrato (silicio o níquel) calentando el gas con un filamento incandescente, radiación de microondas o, incluso, con un soplete oxiacetilénico. El carbono del gas se condensa sobre el substrato, que se halla relativamente frío; las formas más reactivas del carbono (el grafito, por ejemplo) se combinan con el hidrógeno atómico y se eliminan; lo que queda son cristales de diamante.

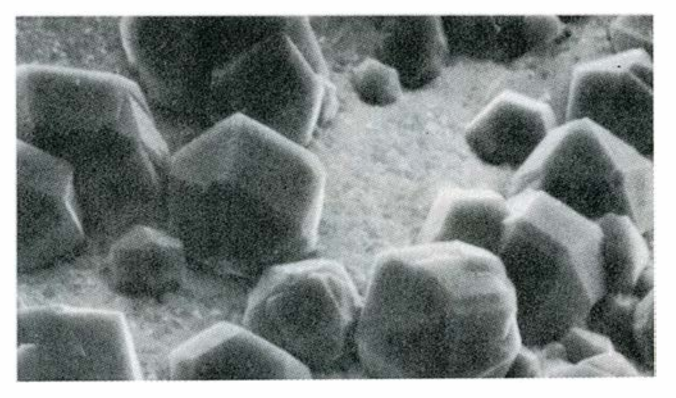
Ello no impide que no acabe de dominarse el proceso del crecimiento. Los intentos empeñados en acelerar la velocidad de deposición dan con frecuencia por resultado defectos e impurezas en los cristales. Aunque las compañías se resisten a revelar las velocidades de deposición, la mayoría apunta hacia un micrometro por hora. La empresa NRL ha logrado formar "cristales claros y de buena calidad" a 50 micrometros por hora y el Instituto de Tecnología de Tokio ha alcanzado velocidades de 930 micrometros por hora, si creemos lo afirmado por sus respectivos portavoces.

Los investigadores están también buscando la forma de rebajar la temperatura del substrato de 900 a 100 o 200 grados Celsius; a tales temperaturas, la película de diamante se podría depositar sobre plástico, por ejemplo. Los plásticos recubiertos de diamante podrían emplearse para casi todo, desde cristales para gafas a prueba de rayas hasta ventanillas reforzadas para aviones, opinan algunos.

Pese a ello, nadie ha cultivado hasta ahora el diamante que podría ser más útil a la industria electrónica: una película de monocristal de diamante, de varios centímetros de diámetro, sobre un substrato que no fuera el mineral. Por ser el diamante un buen conductor del calor y un buen semiconductor al mismo tiempo, los microcircuitos de diamante podrían servir de dispositivos de altísima velocidad. "La electrónica será el gran ganador", predice Russell Messier, que dirige un programa mixto universidad-industria en la Universidad de Pennsylvania; pero señala que pasarán diez años antes de producir tales componentes.

Las empresas están, por tanto, insistiendo en la investigación básica. Mientras tanto, las películas de diamante empiezan a aparecer como producto-comodín. Las hay que proporcionan películas finas de diamante a fabricantes de equipos estereofónicos japone-





1. PELICULAS FINAS DE DIAMANTE cultivadas; están formadas por cristales de diamante (derecha) *de 10 micrometros de tamaño. En una de las técnicas para crear diamantes* (izquierda)*, un filamento de tungsteno incandescente excita una mezcla gaseosa de metano e hidrógeno, liberando átomos de carbono, que se depositan después sobre un substrato de níquel. Fotografías reproducidas por cortesía del Laboratorio Naval de Investigación, de los Estados Unidos.*

ses para altavoces de alta frecuencia. Otras venden ventanas de diamante para instrumentos científicos; se dice que las ventanas transmiten rayos X de baja energía y no permiten las fugas de gases a presión. Pero en Occidente se reconoce que, si bien sus científicos están, en la teoría, a la par con los japoneses, en cuanto al desarrollo o aplicación industrial les andan a la zaga.

La bolsa se renueva

Con la reforma de la bolsa española llegan aires de otros movimientos. Los mayoristas nunca se han opuesto a hacer tratos basados en los futuros precios de las mercancías. Tripas de cerdo, petróleo, oro, acciones, hasta bombillas, han pertrechado sus almacenes. Ahora, dos bolsas distintas han propuesto introducir a los empresarios en el terreno de la alta tecnología, creando futuros mercados para microcircuitos dinámicos de memoria de acceso aleatorio (DRAM).

Los DRAM son la entraña de los ordenadores, de las impresoras láser, las máquinas de reproducción facsímil y de otras. Los microcircuitos se producen en ingentes cantidades; que se lo digan a los fabricantes japoneses, que saben muy bien que los primeros de la lista de productos más vendidos son los microcircuitos de un megabit, capaces de almacenar un millón de elementos.

¿Podrían considerarse los DRAM artículos comerciales, perecederos y de trueque fácil? Ciertamente, según la recién establecida Cámara de Comercio de las Ciudades Gemelas, de Minneapolis, y la Bolsa del Pacífico, de San Francisco. A fines de mayo, ambos grupos anunciaron su intención de comenzar a cotizar DRAM el año próximo, supuesta la aprobación de la normativa pertinente. Los fabricantes y usuarios de microcircuitos, por su parte, han acogido la idea con un punto de hostilidad y mucho de curiosidad.

"No es justo llamar artículo comercial a un DRAM", protesta el portavoz de Texas Instruments, una de las empresas que fabrican DRAM. "Los hay de diferente velocidad y los requisitos de su disposición divergen según el fabricante de ordenadores", argumenta.

A ello, los mayoristas responden que ya están acostumbrados a enfrentarse con la gran diversidad que hay, por ejemplo, en los productos agrícolas. Cada mercancía requiere su contrato, con especificación de sus características exclusivas.

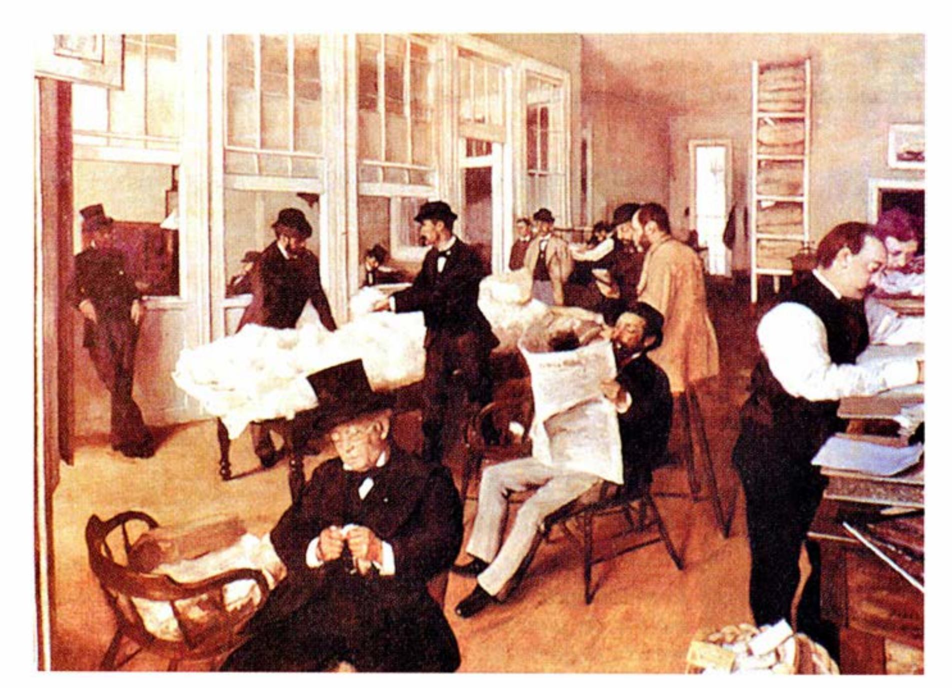
Para los intermediarios, la cotización puede ayudar a estabilizar los precios, sostiene uno de los empeñados en el desarrollo del mercado de valores de DRAM en la Bolsa del Pacífico. De acuerdo con la investigación de mercado, los precios de DRAM de un megabit alcanzaban 18,92 dólares por unidad en el tercer trimestre de 1988 y se espera que desciendan a 16,53 en el tercer trimestre del año en que nos encontramos. Variaciones que penalizan a las empresas de ordenadores, en particular si se han cogido los dedos comprando DRAM de un megabit a precios muy caros.

Pongámonos en la piel de un usuario de pastillas ("chips") que compra por adelantado una buena remesa. Sabe, en enero, que su compañía necesitará probablemente 10.000 microcircuitos de un megabit en julio, pero está preocupado por el aumento de precio. Adquiere una opción a 18 dólares por pastilla; para julio, los precios han subido 0,5 dólares por unidad. El usuario de microcircuitos puede entonces vender su opción ganando 0,50 dólares por pastilla, que cubrirá el aumento de coste al adquirirlos al contado. O bien puede simplemente realizar su opción. De cualquiera de las dos maneras, los microcircuitos no le cuestan más de lo que esperaba.

Los fabricantes de microcircuitos afirman que ellos prefieren establecer "relaciones estratégicas, a largo plazo", para amortiguar las oscilaciones de precios y suministros. Como resultado, se presume que los primeros usuarios del mercado de opciones de DRAM sean empresas medianas, incapaces de establecer tales lazos con las grandes.

No obstante, tanto la bolsa de las Ciudades Gemelas como la del Pacífico tienen ante sí un largo camino. Ciudades Gemelas, que todavía no ha comenzado a operar, introducirá al principio un mercado de DRAM al contado, y después opciones de compra si su iniciativa tiene éxito. (En el mercado al contado, los compradores adquieren mercancías para entrega inmediata.) Ciudades Gemelas patrocina su propia red electrónica para proporcionar una base de datos de información actualizada a sus posibles compradores, vendedores y, con el tiempo, especuladores. La Bolsa del Pacífico, la mayor bolsa de valores y acciones del oeste de los Estados Unidos, propone solamente un mercado de opciones.

Precisamente la clase de valores que las bolsas decidan poner en circulación y la amplitud con que establezcan los términos de los contratos pueden consolidar o destruir el mercado de opciones de DRAM, dicen los observadores. Las compañías han sugerido incorporar ciertas cláusulas en los contratos. Pero, ¿habrá volumen de negocio suficiente para soportar contratos tan detallados como, por ejemplo, DRAM de columna estática, de 1 megabit y tiempo de acceso de 100 nanosegundos, en envoltura de plástico y con cuatro patillas de entrada y salida?



2. EL MERCADO DE VALORES DE ALGODON en Nueva Orleans, pintado por Edgar Degas en el año 1873. ¿Podría ser el antecesor de un mercado de valores de microcircuitos? (Cortesía de la colección Grenger.)

Vulcanismo en los rifts

Cuando la corteza rígida de la Tierra se rompe y separa, las rocas dúctiles del manto ascienden y se funden parcialmente. Basta que el manto eleve algo su temperatura para que se sucedan espectaculares episodios volcánicos

Robert S. White y Dan P. McKenzie

Hace sesenta y seis millones de años, la Tierra se abrió por el lado oeste de la India y, sobre la superficie, se derramaron cantidades ingentes de roca fundida. Cerca de dos millones de kilómetros cúbicos de lava se liberaron en menos de medio millón de años, cubriendo gran parte del centro-oeste de la India con capas de basalto de centenares de metros de potencia. El episodio asestó, quizás, un duro golpe a la estabilidad climática y ecológica del planeta; algunas teorías lo han considerado responsable incluso de la extinción de los dinosaurios. Pero dista mucho de ser un caso aislado; se ha registrado un número elevado de cataclismos similares en los continentes en proceso de separación durante el transcurso del tiempo geológico.

El vulcanismo que se desarrolla en las zonas de fractura y separación ("rifts") adopta otra apariencia más tranquila, que, a largo plazo, implica, sin embargo, una mayor actividad volcánica. El vulcanismo se produce de forma constante, aunque se escapa a la observación, a lo largo del sistema de dorsales centro-oceánicas que recorren el fondo de los suelos marinos. Estas dorsales señalan los rifts donde las emisiones de magma generan unos 20 kilómetros cúbicos de corteza oceánica nueva cada año.

El contraste existente entre el vulcanismo repentino y catastrófico que se registra en los basaltos de avenida o "plateau" ("flood basalts") y el vulcanismo continuado y rutinario que genera la corteza oceánica ha llevado a que muchos investigadores sugieran que los mecanismos subyacentes deben ser diferentes. Pero nos hallamos ya en condiciones de explicar ambos tipos de vulcanismo de rift y dar cuenta del volumen y la composición del magma que producen, amén de los movimientos verticales de la corteza en proceso de fractura y de separación; y justificarlo todo ello mediante un solo mecanismo: se basa éste en ideas físicas simples y en procesos bien conocidos de la tectónica de placas.

La idea fundamental es muy sencilla. El vulcanismo de rift acontece cuando los movimientos tectónicos provocan que la capa exterior de la Tierra se estire y termine por rajarse, dejando que el manto subyacente ascienda y penetre en zonas de presión más baja, donde se funden algunos componentes de la roca caliente y sólida del manto. Las diferencias entre el vulcanismo catastrófico en algunos rifts y el proceso más tranquilo en otros reflejan, simplemente, las diferencias en las condiciones iniciales; en particular, la temperatura del manto parental. Nos valemos de dos clases de pruebas: las descripciones cuantitativas de la fusión de rocas y una amplia gama de observaciones acometidas en los bordes de separación de los continentes y en los océanos abiertos entre ellos.

Del laboratorio a la Tierra

Los investigadores han estudiado, durante mucho años, la fusión de las rocas del manto, mediante la simulación, en el laboratorio, de las temperaturas y presiones que se dan en las profundidades de la Tierra. Un volumen aproximado de un milímetro cúbico de roca de la misma composición que el manto de la Tierra se calienta y comprime hasta una temperatura y presión determinadas; luego, se le enfría rápidamente. Cualquier material que se haya fundido, solidifica como un vidrio, que puede analizarse con el fin de conocer el volumen y composición del mismo. Una mayor temperatura incrementa la fusión y cambia su composición, al fundirse sucesivamente los componentes más refractarios de la roca. Una mayor presión rebaja el porcentaje de fusión, al elevar el "solidus", la temperatura a la que la roca comienza a fundirse.

Se han llevado a cabo muchos experimentos de este tipo durante los últimos años, gracias, entre otros, a David Green y sus alumnos de la Universidad de Tasmania, A. E. Ringwood, de la Universidad Nacional de Australia, David Walker y Edward M. Stolper, de la Universidad de Harvard, Eiichi Takahaski e Ikuo Kushiro, de la Universidad de Tokio, y Toshitsugu Fuji y Christopher M. Scarfe, de la Universidad de Alberta, siendo conocidas las fuertes controversias en este campo. No obstante, los resultados experimentales obtenidos concuerdan muy bien: uno de nosotros (McKenzie), junto con Michael J. Bickle, de la Universidad de Cambridge, pudo transformar las numerosas observaciones en expresiones matemáticas sencillas que describen el modo en que el volumen y la composición del material fundido dependen de la temperatura y de la presión. Se comprobó que la mayoría de las discrepancias de los resultados experimentales apenas superaban los límites de error de las medidas.

¿De qué forma podrían aplicarse estas formulaciones a la fusión en las zonas de rift? Los procesos de la tectónica de placas, incluidos la fractura y sepa-

ROBERT S. WHITE y DAN P. McKENZIE pertenecen al claustro de la Universidad de Cambridge. White, que dirige el grupo de geofísica marina, acaba de recibir el nombramiento de catedrático de esa disciplina; McKenzie lo es de ciencias de la Tierra. Ambos obtuvieron el doctorado en Cambridge, White en 1977 y McKenzie en 1966. Han desarrollado la mayor parte de su carrera en ese centro superior, aunque han trabajado también en institutos de investigación y universidades de los Estados Unidos. White y McKenzie han encabezado extensas campañas de tectónica, geología y sismología continental y oceánica.

ración (el "rifting") y el desplazamiento las mismas, afectan a la capa exterior rígida de la Tierra, la litosfera; comprende ésta la corteza y el manto subyacente hasta una profundidad media de unos 120 kilómetros. Por debajo de esa profundidad, el manto permanece sólido aunque se vuelve dúctil, con la ductilidad del cristal de ventana a temperatura ambiente, es decir, lo suficientemente como para fluir a la escala del tiempo geológico. Cuando, a medida que se separan las placas, la litosfera suprayacente se estira y adelgaza o se rompe, la astenosfera, así se denomina ese manto dúctil, asciende, ocupando su lugar. Con la ascensión de la roca del manto, disminuye la presión a que está sometida.

Si esa subida es medianamente rápida –del orden de unos centímetros por año–, como suele ocurrir cuando se rompen y separan las placas, el manto no tendrá tiempo de perder calor por conducción y acabará por alzarse hasta un nivel en que su temperatura exceda la del solidus. Al principio, sólo se produce un pequeño volumen de material fundido, formado por los componentes de la roca con temperaturas de fusión más bajas; pero, a profundidades más someras, aumenta la fracción fundida.

Considerando la temperatura del manto ascendente y el grado de adelgazamiento de la litosfera, nuestras expresiones matemáticas predicen el volumen y composición del material fundido que se produce en cada nivel de la zona de fractura y separación. La suma de los resultados para toda la profundidad de fusión da el volumen total de fundido y su composición neta. Al variar las condiciones de partida, nos encontramos con un sorprendente descubrimiento: para cierto grado de adelgazamiento litosférico, el volumen de magma producido resultaba sumamente sensible a pequeñas variaciones en la temperatura del manto parental.

¿Cuánto fundido logra separarse del manto y salir en el vulcanismo o quedar atrapado en la corteza? El material fundido tiende a ascender porque está constituido por los componentes más ligeros de la roca. El que pueda o no traspasar la roca suprayacente depende, sin embargo, de su capacidad de "mojar" los granos de la roca. Es fácil, por ejemplo, atrapar una pequeña gota de mercurio sobre un paño, porque no puede mojar las hebras. El agua, sin embargo, se cuela a través del mismo.

Los estudios de laboratorio sugieren que el comportamiento de la roca fundida se aproxima más a la conducta del agua que a la del mercurio. Stolper y Walker, de Harvard, y Donald L. Turcotte, de la Universidad de Cornell, sostienen que el fundido debería separarse rápidamente de los cristales residuales y sin fundir, una vez que constituye más del 1 o 2 por ciento de la muestra. Los cálculos minuciosos llevados a cabo por David R. Scott y David J. Stevenson, del Instituto de Tecnología de California, y por uno de nosotros (McKenzie) han confirmado que toda la roca fundida debería, esencialmente, liberarse de la zona de fusión. Los efectos de las variaciones de la temperatura sobre la tasa de fusión ha-



1. PAISAJE ESCALONADO de Traps de Deccan en la India. Se formó en un período de unos 500.000 años por una serie de gigantescas coladas de lava; cada capa representa una erupción principal. Las emisiones se iniciaron hace 66 millones de años, cuando se abrió un rift sobre una zona de manto caliente.

brían, pues, de dejarse ver cerca de la superficie.

Un laboratorio natural

La Tierra nos brinda un soberbio laboratorio natural donde comprobar nuestro modelo de producción de magma en los rifts: el suelo oceánico. Cada dorsal centro-oceánica señala un rift entre dos placas que se están distanciando de forma constante, mientras la actividad volcánica añade material continuamente a los bordes en retroceso de las placas. Algunos científicos han sostenido que un foco local de calor en el manto explicaría el vulcanismo, pero nuestro modelo debía poderlo justificar apelando sólo a la fusión por descompresión.

En el rift oceánico se está rompiendo la litosfera; con ello, permite que la astenosfera ascienda casi hasta la superficie. Al caer la presión, se genera magma que forma la nueva corteza oceánica. Las expresiones cuantitativas del modelo deberían explicar la potencia de la corteza (que indica el volumen del fundido) y su composición.

Cañones de aire o explosiones en la superficie del mar generan ondas sónicas de baja frecuencia que, al igual que las ondas sísmicas, pueden penetrar en la corteza oceánica y en el manto litosférico subyacente. Estas ondas sísmicas se refractan o se reflejan de nuevo hacia la superficie por culpa de las diferencias en la velocidad sísmica y la densidad, entre otras propiedades de las rocas; de esta forma, se puede deducir la imagen de las capas por debajo de la superficie. A lo largo de los últimos treinta años, la técnica de los perfiles sísmicos ha mostrado que la potencia de la corteza oceánica se mantiene notablemente constante, con una media de seis o siete kilómetros.

Esta potencia constante recibe una fácil explicación en el marco de nuestro modelo de generación de fundido por disminución de la presión: el manto ascendente pierde presión en la misma cuantía, sea cual fuere la velocidad a la que se separan las placas. Más aún, dada una temperatura del manto en el rango esperado, de 1320 a 1360 grados, el modelo predice la generación del volumen preciso de magma. El manto a 1340 grados C debería comenzar a fundirse cuando ascendiera a una profundidad de unos 50 kilómetros; para cuando llegara a la superficie, un promedio del 25 por ciento de la roca tendría que haberse fundido. El resultado sería la corteza oceánica de la potencia observada. Nuestro sencillo modelo de fusión por descompresión razona, pues, la producción de magma en las dorsales centro-oceánicas y establece un valor de sorprendente exactitud para la temperatura del manto subyacente. Además, la potencia constante de la corteza oceánica implica que la temperatura no varía en más de 20 grados, y ello en casi todo el planeta. El modelo predice, también, la composición del material fundido que se libera en las dorsales centro-oceánicas, reproduciendo con exactitud la composición media conocida de la corteza oceánica. Resulta alentador que Emily M. Klein y Charles H. Langmuir, del observatorio geológico Lamont-Doherty de la Universidad de Columbia, hayan encontrado pruebas, en una revisión de datos de todo el planeta, de que la temperatura constante del manto en las dorsales centro-oceánicas guarda correlación con la potencia y la composición constantes de la corteza.

Continentes sometidos a un proceso de fractura y separación

La formación de una cuenca oceánica comienza cuando un continente se estira, estiliza y termina por romperse. (Es decir, sufre un proceso de "rifting".) Lo mismo que en las dorsales centro-oceánicas, ese proceso tensor y divisor permite que el manto subyacente ascienda y se funda a medida que se relaja la presión sobre el material ascendente. ¿Cómo aborda nuestro modelo el magmatismo que resulta del comienzo del "rifting" en un continente?

En ciertas regiones continentales, la litosfera se ha estirado algo –un factor de dos, por dar una cifra– tras lo cual cesa el estiramiento. Las ecuaciones de fusión por descompresión predicen que la ascensión limitada debería producir poco material fundido, o ninguno en absoluto. Ahora bien, tales regiones ilustran un fenómeno que conforma todos los rifts continentales: la subsidencia de la corteza.

Los continentes están situados por encima del nivel del mar porque la corteza continental flota sobre el manto, más denso, que se encuentra debajo. El estiramiento litosférico reduce la potencia de la corteza continental, provocando el descenso de ésta por debajo del nivel del mar. Parte de la subsidencia inicial se ve compensada por un segundo proceso: el adelgazamiento o estilización del manto litosférico subyacente, lo que permite que el manto astenosférico más caliente (por tanto, menos denso) lo reemplace. El material añadido se enfría luego hasta la temperatura normal de la litosfera, continuando la subsidencia, denominada ahora subsidencia térmica.

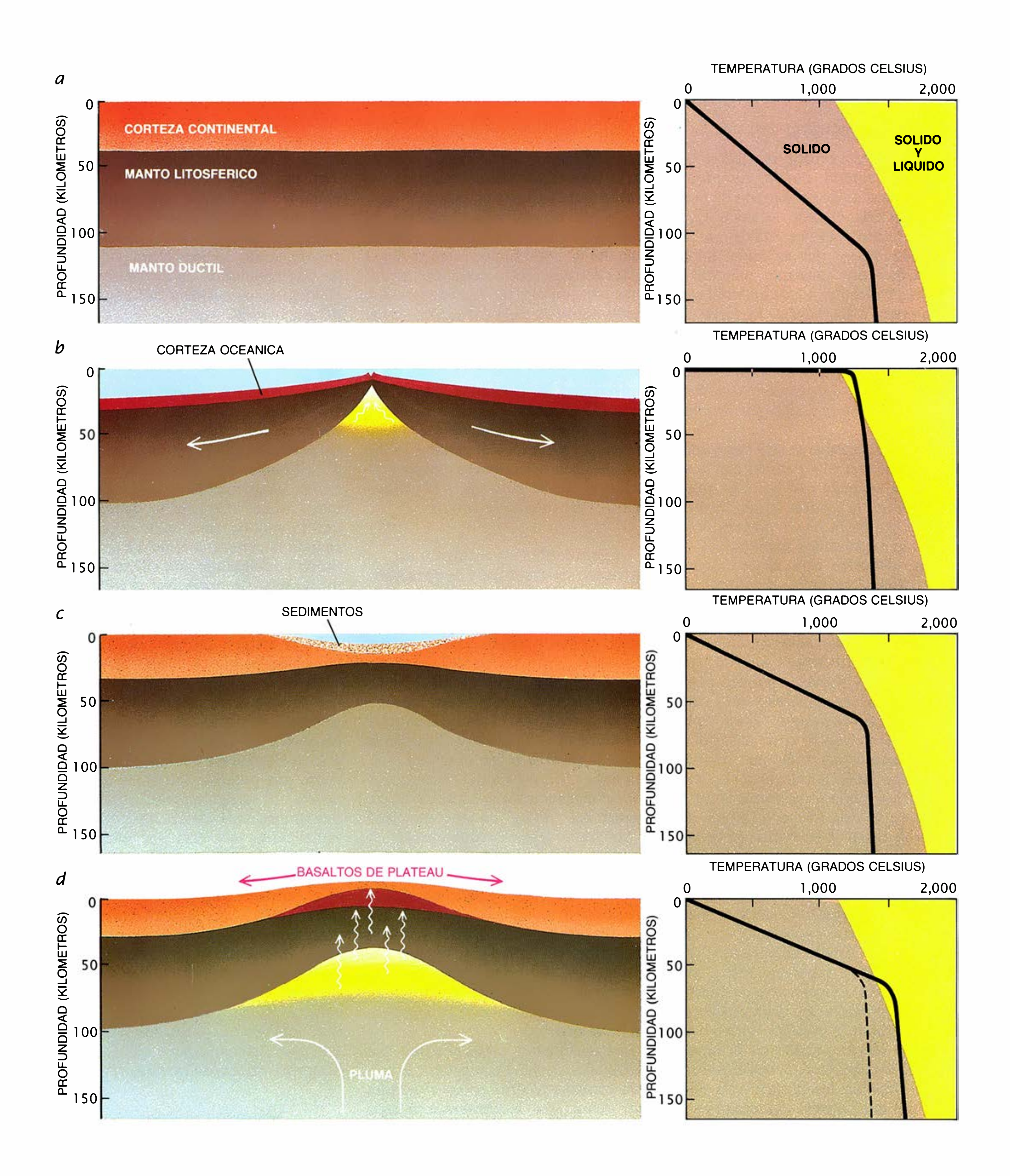
El resultado es una cuenca hundida muy por debajo del nivel del mar, en la que se acumulan los sedimentos. El mar del Norte constituye un buen ejemplo: la litosfera continental subyacente se ha estirado en aproximadamente un 35 por ciento y creado una cuenca donde se han acumulado más de dos kilómetros de sedimentos, incluidos los precursores del petróleo y del gas natural.

Si no cesa el estiramiento de la litosfera continental, el continente termina por partirse en dos; se desarrolla entonces un nuevo océano entre los dos bordes que se distancian. Los márgenes continentales que antaño limitaban el rift recién creado registran la secuencia de estiramiento, subsidencia y vulcanismo. La aplicación de los perfiles sísmicos a tales márgenes ha demostrado que la ruptura final suele sobrevenir cuando la corteza continental se ha estirado y adelgazado más allá de un factor de seis. De ordinario, el rift libera poco volumen de magma hasta que el continente se parte por entero.

En el margen del golfo de Vizcaya, por ejemplo, que se formó hace unos 120 millones de años al abrirse esa zona del Atlántico, el continente europeo termina en una cuña de 200 kilómetros de ancho; en ella, la corteza se adelgaza gradualmente en dirección al mar, desde una potencia inicial de 30 kilómetros. El adelgazamiento produjo la subsidencia de la corteza, de forma que actualmente yace muy por debajo del nivel del mar. No hay indicios claros de vulcanismo hasta que, lejos de la costa, en el borde de la plataforma continental, se reduce la potencia de la corteza hasta una cuarta parte de su valor original. En ese punto, la bordea una estrecha zona de transición que aloja rocas ígneas; ésta, a su vez, da paso a la corteza oceánica de una potencia de siete kilómetros, producida por la fusión por descompresión en el nuevo centro de expansión marina.

Márgenes volcánicos

No todos los márgenes de rift muestran esa transición ordenada de corteza continental a oceánica. Hacia 1980, Karl Hinz, del Instituto Federal Alemán de Ciencias de La Tierra y de Recursos Naturales de Hannover, encontró pruebas de la existencia de potentes capas de roca bajo los sedimentos superficiales en algunos márgenes de rift continental. Hinz postuló que las ca-



2. ADELGAZAMIENTO O ESTILIZACION DE LA LITOSFERA (la corteza y la parte superior del manto). Ese proceso conduce a la fusión parcial de las rocas calientes y dúctiles subyacentes. En la litosfera sin estilizar (*a*), la temperatura (*curva gruesa*) aumenta con la profundidad, si bien la presión creciente impide la fusión de la roca dúctil bajo la litosfera. (Los colores del gráfico indican el efecto de la profundidad en la temperatura de fusión.) Allí donde la litosfera sufre el proceso de fractura y separación ("rifting") formando una cuenca oceánica (*b*), las rocas del manto caliente pueden ascender a la superficie. Al bajar la temperatura de fusión con la caída de la presión, parte del material inicialmente sólido funde al subir. El magma resultante solidifica y crea corteza oceánica. Si la litosfera sólo se estira, verbigracia en un factor de dos –como ocurre en un rift incipiente o en una cuenca sedimentaria (*c*)–, no se suele producir fundido. El manto caliente asciende y la curva de temperatura se aproxima, sin llegar a alcanzar el campo de fusión. Ahora bien, si una pluma del manto calienta la roca unos 200 grados C más (*d*), el mismo factor de estiramiento conduce a un paroxismo volcánico. La reducción de presión en el manto ascendente genera magma que se extiende por la superficie, en forma de basaltos de avenida (de "plateau") y se incrusta en la base de la corteza. (Ilustración de George Retseck.)

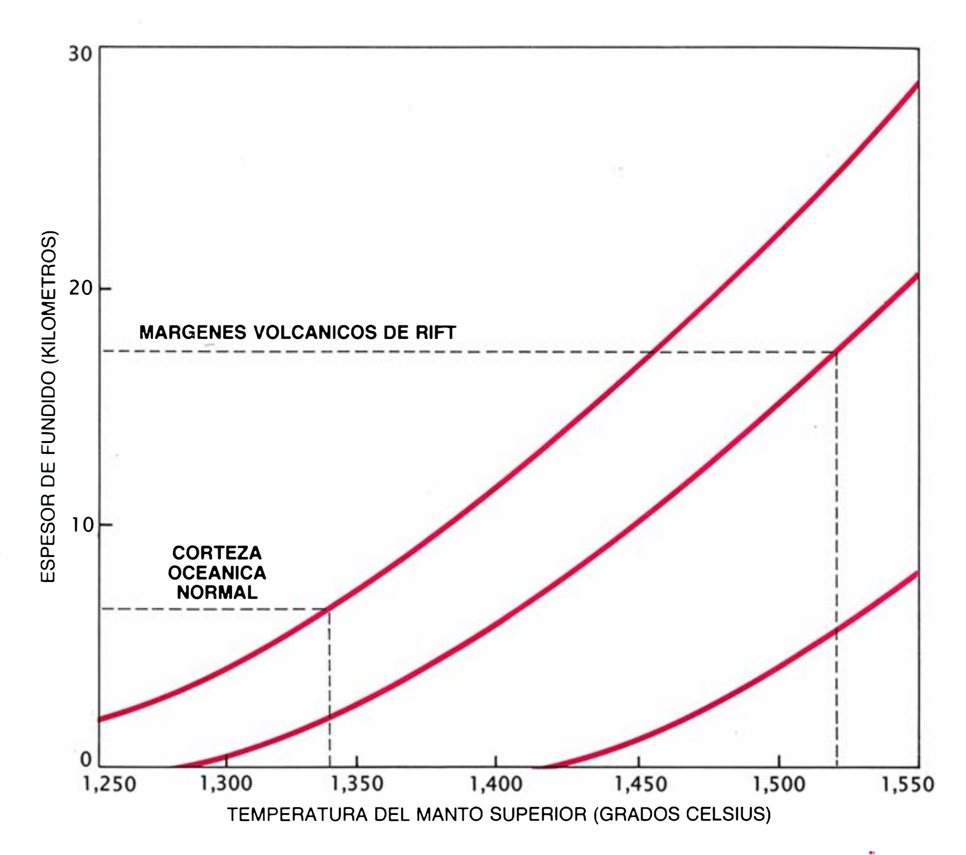
pas, de un espesor de muchos kilómetros, procedían de coladas de lava muy voluminosas, emitidas y depositadas sobre la corteza continental adelgazada durante el período de distanciamiento (período de "rifting").

La hipótesis de Hinz se basaba en perfiles sísmicos de los márgenes continentales de todo el planeta. Se recibió con escepticismo en los círculos académicos, ya que la distribución de las capas se asemeja, en muchos aspectos, a las espesas acumulaciones de sedimentos que se observan en los deltas sumergidos de los ríos. La controversia se resolvió cuando el "Proyecto de Prospección del Fondo Marino" obtuvo testigos de la roca del suelo oceánico en las costas de Noruega. Las capas eran de basalto, similar en muchos puntos a los basaltos que se forman en los centros de expansión oceánicos.

Una vez conocidas sus pautas características de reflexión, se identificaron las capas volcánicas de muchos márgenes continentales. Sabemos ahora que abarcan 2000 kilómetros a lo largo de la costa este de Groenlandia y, al otro lado del Atlántico septentrional, en una distancia comparable a lo largo del banco de Hatton (por las costas de Escocia) y por la costa oeste de Noruega. Se han rastreado márgenes volcánicos a lo largo de la costa oriental de los Estados Unidos, de las costas antagónicas de Sudamérica y de Africa, por las de la Antártida y por las costas occidentales de la India y Australia.

Está, pues, comprobado que se extendieron enormes volúmenes de lava sobre la corteza continental durante las etapas iniciales de muchos rifts. Más aún. En el transcurso de una campaña sísmica a través del banco de Hatton, durante el verano de 1985, descubrimos que las capas ígneas poco profundas registran sólo parte de los episodios volcánicos. Debajo mismo del margen continental, entre la corteza estilizada y el manto litosférico, los perfiles revelaron un prisma masivo de roca ígnea, de hasta 18 kilómetros de potencia. Otros autores han encontrado depósitos volcánicos equiparables, emplazados en la base de la placa, en la sección noruega del margen.

No parece probable que la parte oriental del rift del Atlántico norte sea, en absoluto, singular. Se han aportado verosímiles pruebas sísmicas de la existencia de depósitos por debajo de la placa en otros márgenes volcánicos. Antes incluso de nuestro estudio del banco de Hatton, algunos autores, en particular Keith G. Cox, de la Universidad de Oxford, habían sugerido la presencia de intrusiones ígneas en la base de la corteza, por debajo de todos los basaltos de avenida ("plateau" o "flood basalts") poco profundos.



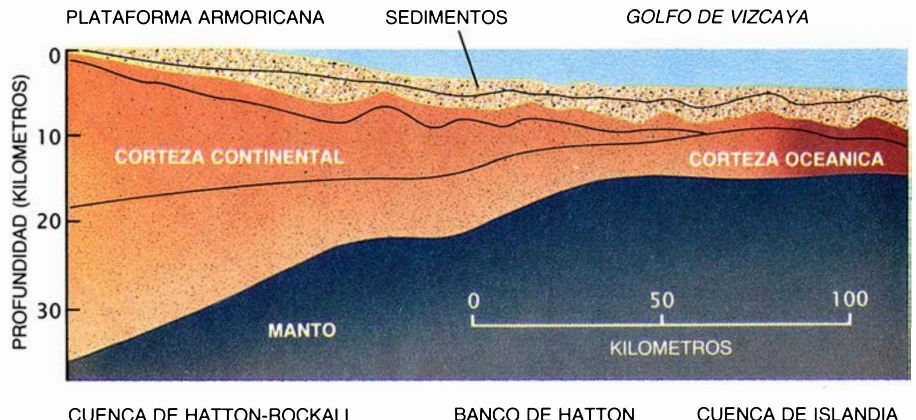
3. ESPESOR DE LA CAPA FUNDIDA generada en un rift. Dicha potencia depende del grado de adelgazamiento de la litosfera y de la temperatura del manto subyacente. El modelo de los autores predice que la estilización en un factor de dos (*curva inferior*), sobre manto con temperatura normal de 1340 grados, no produce fusión; el adelgazamiento en un factor de cinco (*curva central*) genera pequeñas cantidades de fundido. La ruptura de la litosfera (*curva superior*) genera una capa de material fundido de 6,5 kilómetros de espesor, la potencia media observada en la corteza oceánica. Pero si el manto es más caliente en menos de 200 grados, la litosfera adelgazada en un factor de cinco genera suficiente material fundido para producir los depósitos masivos de basalto, con espesores de 15 kilómetros y aún más, observables en bordes de rift.

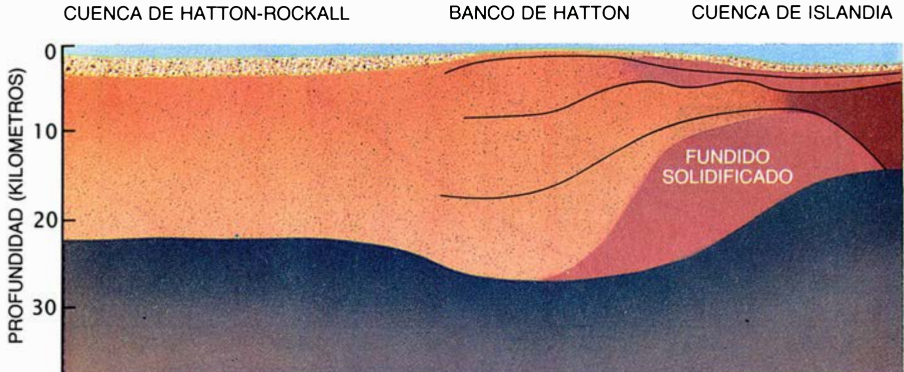
Una vez se tiene en cuenta el material subyacente a la placa, se comprueba que el volumen de magma liberado a lo largo de tales rifts es, en verdad, ingente. Las capas ígneas extruidas sobre el margen de la zona oriental del Atlántico norte, a lo largo de 2000 kilómetros, tienen una potencia media de cuatro a seis kilómetros y una anchura de unos 50 a 100 kilómetros: un volumen total de roca de uno a dos millones de kilómetros cúbicos. Si a esto se añade la roca que se ha intruido en la corteza inferior, el volumen se eleva hasta un total de cinco a diez millones de kilómetros cúbicos, todos emplazados en un período de pocos millones de años, como mucho, a medida que el rift del Atlántico norte partía el protocontinente.

No es fácil hacerse una idea intuitiva de lo que suponen diez millones de kilómetros cúbicos de roca. Mirando el mapa, necesitaríamos roca suficiente para cubrir Estados Unidos, incluida Alaska, con un kilómetro de espesor. O imaginarnos veinte camiones vertiendo lava cada segundo, día y noche, año tras año, durante un millón de años. Si otros bordes de rift, como el de Vizcaya, produjeron un volumen tan escaso de material fundido, ¿cómo explicar un paroxismo tan ingente y repentino?

Calor del manto

Dimos con la clave para comprender estos márgenes volcánicos en torno a una taza de té en la cafetería de Madingley Rise, el edificio de Cambridge donde los dos trabajamos. Por aquellas fechas, McKenzie y Bickle se hallaban enfrascados en el análisis de sus datos de laboratorio sobre la fusión; habían encontrado que el volumen de material fundido producido por la descompresión del manto aumentaba de forma drástica con pequeños incrementos –de 100 o 200 grados– de la temperatura del manto. Por aquellos días también, White y Robert C. Courtney (alumno entonces de doctorado) acababan de cartografiar una anomalía térmica de gran escala por debajo del océano Atlántico. Habían establecido un área de





5. PLUMA DE MATERIAL ROCOSO anormalmente caliente, ascendiendo de las profundidades del manto. La influencia de la misma trasciende el punto caliente, que abarca sólo el eje de la pluma en cuestión. Las isolíneas de este modelo de ordenador del manto situado por debajo del punto caliente de Cabo Verde indican desviaciones de la media de la temperatura normal del manto superior: 1340 grados Celsius. Las líneas muestran que la pluma, al entrar en contacto con la litosfera, se desvía y expande, dando lugar a una región con temperaturas del manto elevadas de más de 1000 kilómetros de anchura. Otras plumas, como la que existe bajo Islandia, generan anomalías térmicas que sabemos alcanzan hasta 2000 kilómetros de amplitud.

unos 1500 kilómetros de diámetro donde la temperatura del manto era quizás unos 150 grados superior a la normal. Mientras comentábamos esos resultados, vimos que la respuesta se escondía en la conjunción de esas líneas de trabajo, sin relación aparente.

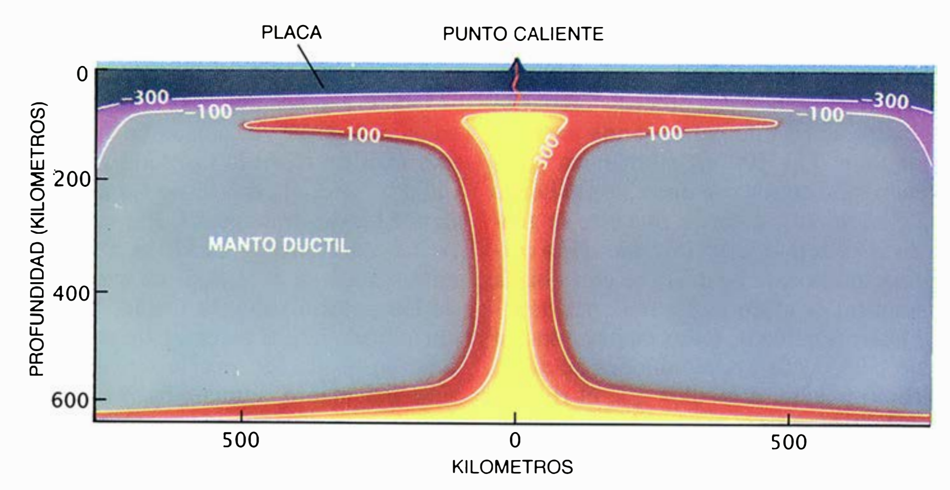
La anomalía estudiada por Courtney y White tenía su centro en el punto caliente de Cabo Verde: una zona solitaria de intensa actividad volcánica en el Atlántico ecuatorial; se la supone sobre una pluma de material insólitamente caliente que asciende del manto, desde gran profundidad. A los puntos calientes se les había venido considerando fenómenos focalizados: finos penachos de material caliente que disparaban el vulcanismo directamente encima suyo. Ahora bien, la influencia del punto caliente de Cabo Verde se dejaba sentir en un área extensa. Los mapas del fondo del océano y del campo gravitatorio terrestre habían revelado la existencia de un abombamiento del fondo del océano, de 1500 kilómetros de extensión, alrededor del punto caliente.

Descubrimos la causa cuando hicimos descender sensores hasta el fondo oceánico, para medir el flujo de calor a través de los sedimentos: en zonas distantes del punto caliente, el manto subyacente permanece a una temperatura entre 100 y 150 grados superior a la normal. A medida que el fino penacho por debajo del punto caliente de Cabo Verde entra en contacto con la litosfera, se transforma en un hongo de material caliente y boyante. El frente ensanchado de la pluma abomba el fondo del océano.

Es probable que regiones similares de manto anómalo rodeen otros puntos calientes. La causa del vulcanismo generalizado en algunos rifts se hace así evidente. Si un rift se abre sobre "el sombrecillo de hongo" del manto caliente, se generará mucho más fundido por descompresión del material ascendente de lo que resultaría en un rift emplazado sobre un manto de temperatura normal. El incremento por encima de la temperatura normal del manto y la anchura de las regiones anómalamente calientes constituyen los requisitos necesarios para justificar la cuantía de material fundido liberado y la longitud de los márgenes volcánicos. El escenario explica también la celeridad de tales erupciones. Cuando el manto insólitamente caliente asciende a través de un rift y experimenta un descenso de presión, se generará de inmediato un material fundido que subirá raudo a la superficie.

Esta explicación de los rift volcánicos admite fácil comprobación: debería haber indicios de la presencia de una pluma de manto próxima cada vez que un rift continental produce grandes volúmenes de fundido. El acoplamiento de los continentes separados es inmediato. El fondo oceánico generado en el alejamiento mutuo aporta un registro continuo de sus movimientos en relación con los bordes de placa. Por otro lado, se cree que los puntos calientes están, en gran parte, fijos en el manto; ahora bien, como las placas se mueven, el rift puede distanciarse de un punto caliente. Es fácil seguir el movimiento relativo del punto caliente porque la pluma deja tras sí un reguero de cordilleras volcánicas, islas y montes submarinos sobre la placa suprayacente.

El Atlántico norte, por ejemplo,



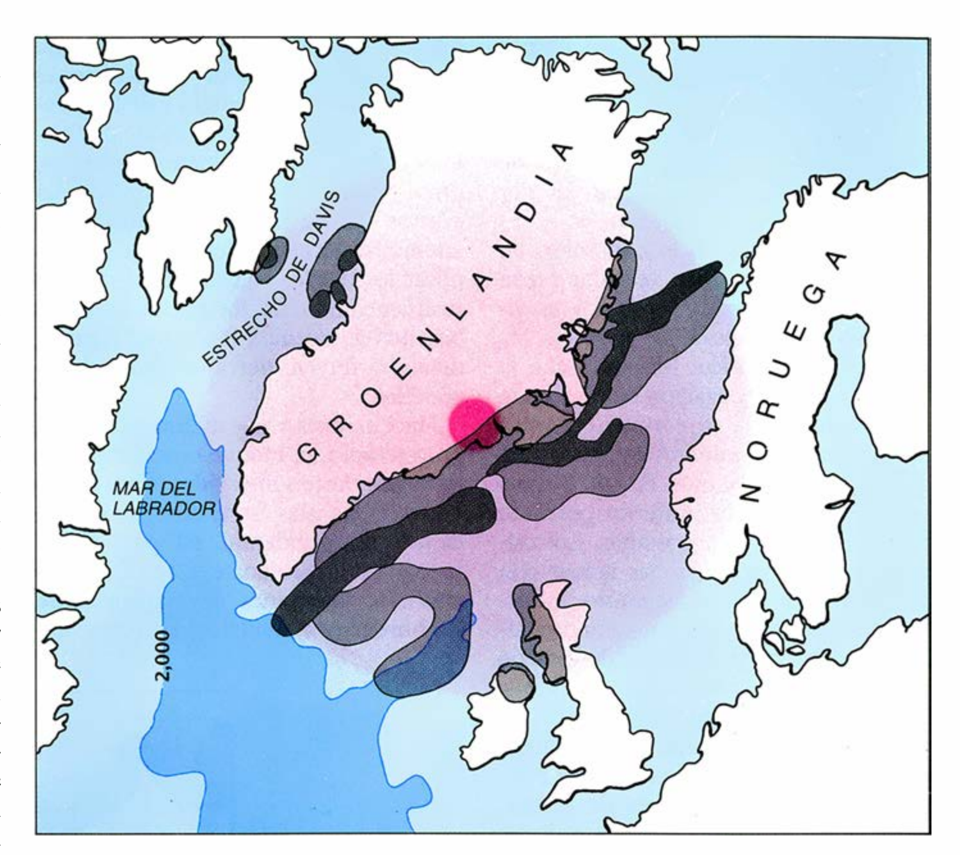
4. MARGENES CONTINENTALES formados a partir de rifts; registran diferente actividad volcánica. Un perfil del margen europeo del golfo de Vizcaya (*arriba*), elaborado con datos sismográficos obtenidos conjuntamente por el Instituto de Ciencias Oceanográicas de Inglaterra, el Instituto Francés del Petróleo y el Centro Oceanográfico de Bretaña, muestra una corteza continental estirada y adelgazada, sin señales de actividad volcánica hasta un poco antes de la transición a corteza oceánica. En cambio, un perfil a través del banco de Hatton (*abajo*), al oeste de Escocia, pone al descubierto capas de rocas ígneas con potencia de muchos kilómetros, emplazadas encima y debajo de la corteza continental adelgazada. La fractura y la separación ("rifting") que originaron este margen acontecieron sobre un manto que se hallaba insólitamente caliente.

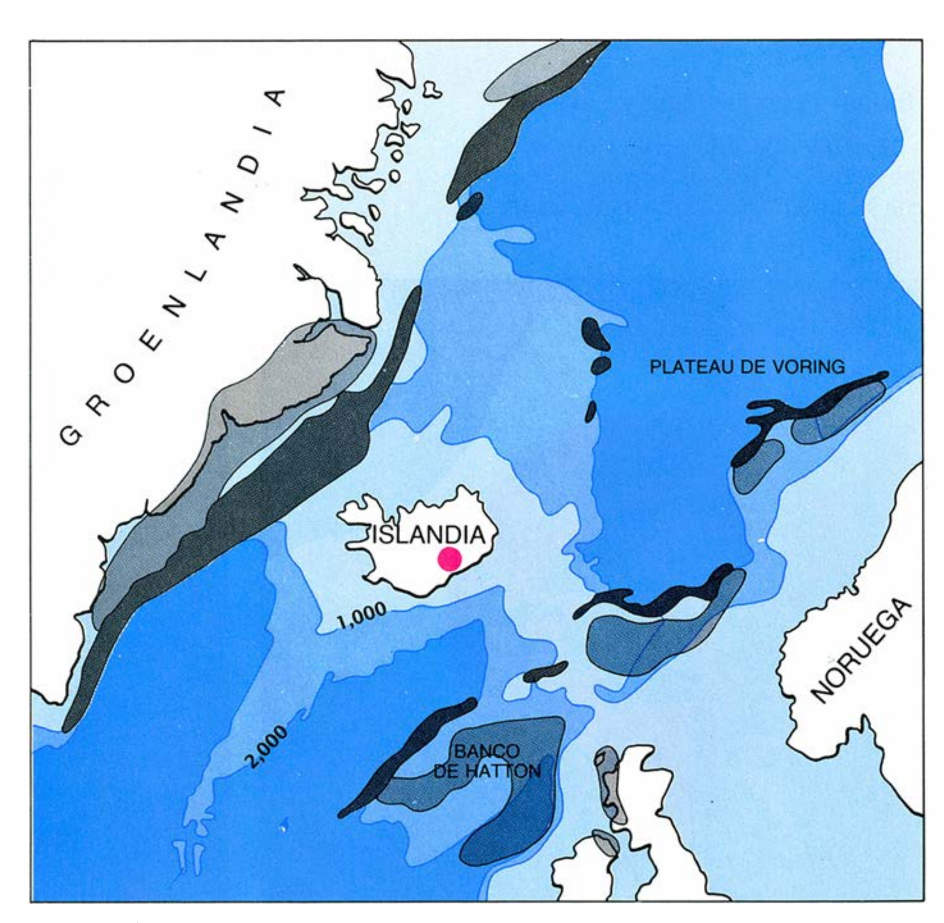
donde los basaltos sumergidos de avenida ("plateau") se cartografiaron por primera vez, tiene una pluma bajo Islandia (un foco de intensa actividad volcánica). El fondo oceánico, en un entorno de 1000 kilómetros alrededor de Islandia, es un kilómetro más somero de lo normal, abombado por el sombrerillo de hongo de manto anómalo que existe alrededor del punto caliente. Las reconstrucciones paleogeográficas de la época en que se abrió el Atlántico norte, hace 57 millones de años, indican que la pluma se ubicaba entonces justo al oeste del rift. Su cabeza englobaba los 2000 kilómetros de márgenes continentales a lo largo de cuya extensión se encuentran ahora potentes depósitos de rocas volcánicas.

Tan pronto como nos convencimos de que el proceso de estiramiento y fractura sobre un manto anormalmente caliente podía explicar la extensión del volcanismo en el Atlántico norte, sospechamos que ese escenario podría asimismo justificar otras características de los márgenes. Aunque, por ejemplo, el estiramiento de la litosfera produce el hundimiento o subsidencia de la corteza, se sabía, por depósitos de sedimentos de lagos y ríos atrapados en las capas ígneas de los márgenes, que el vulcanismo tuvo lugar, sin embargo, por encima del nivel del mar. ¿Qué fue lo que impidió la subsidencia?

La respuesta reside, en parte, en la pluma, de baja densidad, que levanta la corteza que bordea el rift, según atestiguan los abombamientos existentes alrededor de los puntos calientes de Islandia y Cabo Verde. Además, el material ígneo añadido engrosa la corteza que, en virtud del estiramiento, debería ser más delgada. Otros factores intervienen también; con todo, mientras que la corteza estirada, en un factor cinco, por encima del manto a temperatura normal, se hunde inmediatamente dos o tres kilómetros, cuando se da el mismo grado de estiramiento encima de una anomalía térmica de 150 grados produce un levantamiento. Por supuesto que acaba ocurriendo una subsidencia térmica, razón por la cual muchos bordes volcánicos yacen hoy por debajo del nivel del mar.

El proceso de separación o "rifting" por encima de un manto a temperatura elevada explica también la composición de las capas volcánicas. Los resultados de laboratorio demuestran que el magma extraído a una temperatura más elevada encierra mayor contenido de óxido de magnesio que el fundido a temperatura normal. En consecuencia, mientras los basaltos típicos de las dorsales centro-oceánicas presentan un





6. EL ATLÁNTICO SEPTENTRIONAL fue el escenario de una intensa actividad volcánica al abrirse, por un proceso de fractura y separación (de "rifting"), hace unos cincuenta y siete millones de años (*arriba*). Las emisiones produjeron capas masivas de basalto (*gris oscuro*) y regiones con abundantes rocas volcánicas (*gris claro*), a lo largo de los márgenes continentales. Las posiciones del punto caliente de Islandia (*rojo*) y de la zona con manto anormalmente caliente que lo rodea (*rosa pálido*) se indican sobre la reconstrucción paleogeográfica. La extensión de la anomalía térmica es la adecuada para explicar la longitud de los márgenes volcánicos y los depósitos de rocas ígneas del oeste de Groenlandia, en el estrecho de Davis. La existencia actual de una amplia región de fondo oceánico anormalmente somero en torno a Islandia refleja la presencia continuada de una pluma del manto (*ilustración inferior*). Las curvas de nivel se indican en metros.

contenido de alrededor de un 10 por ciento de óxido de magnesio, algunas lavas extruidas a lo largo de una rama de la dorsal noratlántica del oeste de Groenlandia (al alcance de la pluma de Islandia) contienen hasta un 20 por ciento de óxido de magnesio.

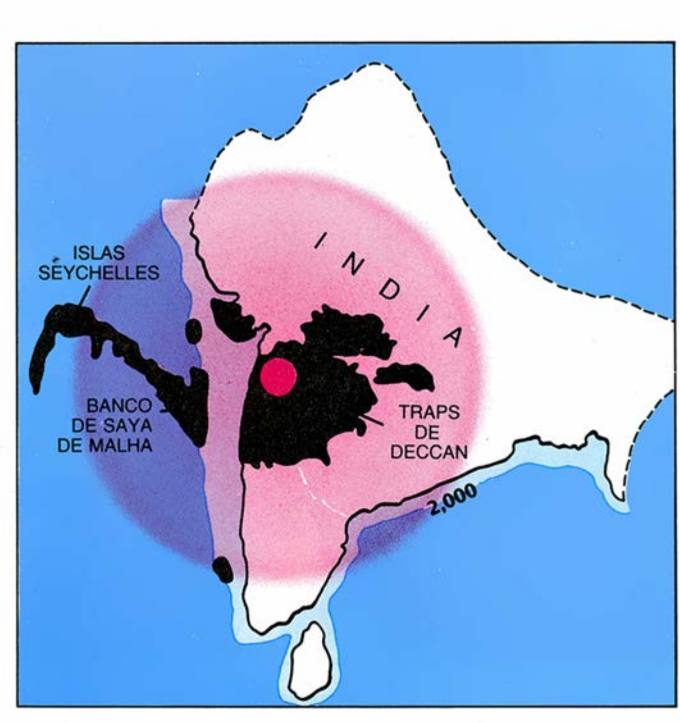
Las rocas de elevado contenido en magnesio pueden, a su vez, dar razón de ciertas mediciones sísmicas y gravimétricas realizadas a lo largo de los bordes del Atlántico. Mientras que la velocidad de propagación sísmica en la mitad inferior de la corteza oceánica normal es de 6,8 kilómetros por segundo, en muchos puntos de los bordes volcánicos la corteza inferior presenta velocidades bastante más altas. Los cálculos prevén que las rocas ígneas con elevado contenido en magnesio, intruidas en la corteza inferior, deberían alcanzar velocidades sísmicas de más de 7,2 kilómetros por segundo, que es más o menos lo que viene a observarse. El óxido de magnesio aumenta igualmente la densidad de las rocas, lo que puede explicar las mediciones de la gravedad que requieren unas densidades inusitadamente elevadas a lo largo de tales bordes.

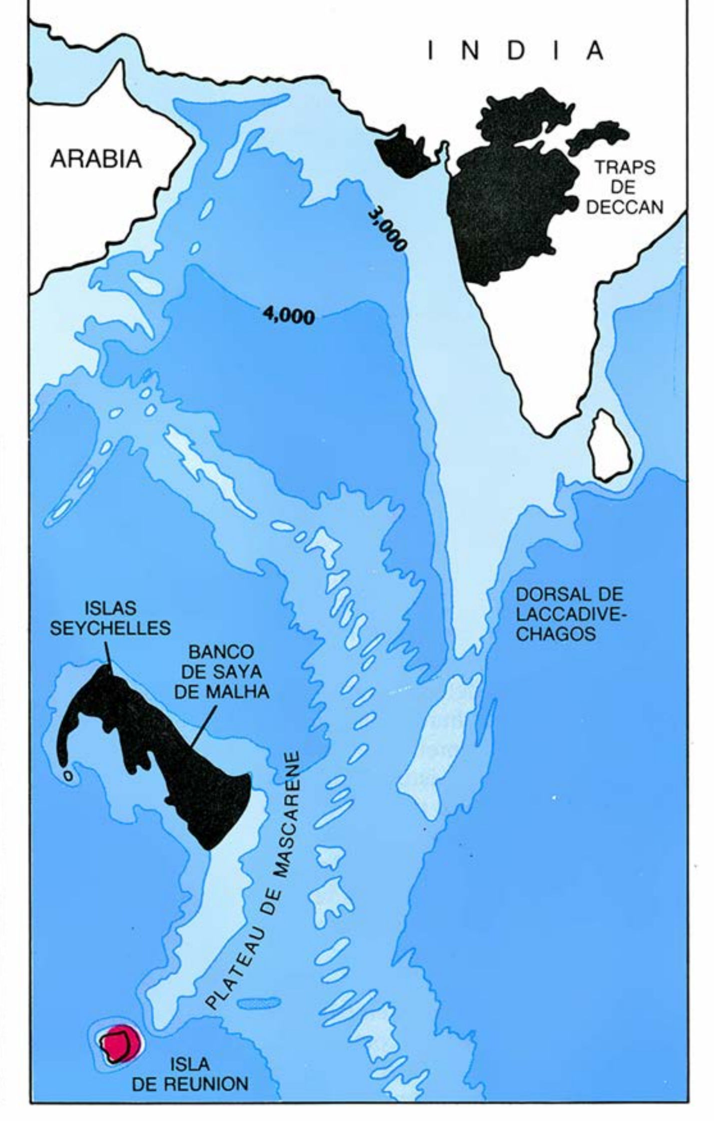
Basaltos continentales de avenida

Nuestro escenario para el origen de los bordes volcánicos encaja también con las pruebas recogidas fuera del ámbito del Atlántico septentrional. Según las reconstrucciones de las posiciones de las masas continentales y de los puntos calientes durante el período de fractura y separación, también se formaron otros bordes de rift, bordeados de depósitos volcánicos masivos, encima de anomalías térmicas del manto. Al explicar los bordes volcánicos, el modelo justifica simultáneamente los extensos basaltos de avenida ("plateau"), que a menudo fluyen tierra adentro desde aquéllos.

Hace sesenta y seis millones de años, por ejemplo, el bloque continental, en su mayor parte sumergido, sobre el que se sitúan las islas Seychelles, se separó de la India occidental. Al igual que el juvenil Atlántico norte, este rift emitió enormes volúmenes de magma sobre los bordes continentales; las rocas volcánicas forman en la actualidad una meseta submarina, conocida como el banco de Saya de Malha, al este de las Seychelles, además de unos extensos depósitos en la costa oriental de la India. El fundido se extendió también durante unos centenares de kilómetros tierra adentro, para formar una vasta meseta basáltica: Traps de Deccan.

Tras la fractura y separación, el subcontinente de la India continuó desplazándose hacia el norte, en un rumbo de colisión con Asia. Dejó muy atrás, al sur, la pluma responsable del vulcanismo, donde se encuentra situada en la actualidad, bajo la isla volcánica de La Reunión. Un reguero de islas volcánicas, montes submarinos y dorsales, dejado sobre la corteza oceánica que ha atravesado el punto caliente, demuestra que, hace unos 66 millones de años, se





7. INDIA Y LAS SEYCHELLES se separaron hace 65 millones de años (*izquierda*). Las rocas volcánicas emitidas durante el proceso de fractura y distanciamiento incluyen los basaltos de avenida de Traps de Deccan, en el continente, y los depósitos submarinos que forman el banco de Saya de Malha. (Extensos depósitos submarinos se encuentran también, probablemente, en la costa de la India.) Los márgenes volcánicos se formaron sobre el manto caliente que circunda el punto caliente de la isla de La Reunión, que entonces se hallaba cerca del rift. Tras el comienzo de éste, el desplazamiento de las placas ha llevado a la India hacia el norte; la corteza poco profunda, engrosada por el volcanismo, de la dorsal de Laccadive-Chagos registra el paso de la placa sobre el punto caliente (*derecha*). En algún momento, la dorsal oceánica (el antiguo rift continental) pasó por encima del punto caliente y se alejó del mismo; la discontinuidad entre la dorsal de Laccadive-Chagos y la meseta de Mascarene –la nueva estela del punto caliente– nos indica la cuantía de la expansión del suelo oceánico.

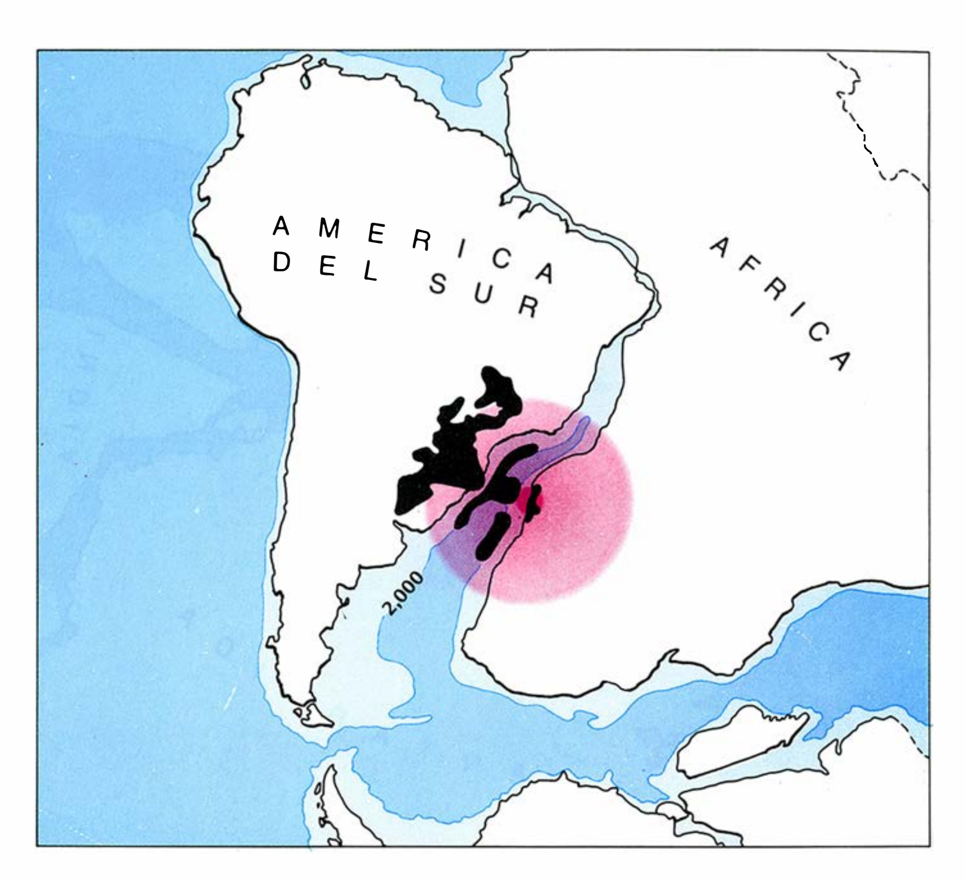
encontraba exactamente bajo el rift en proceso de desarrollo.

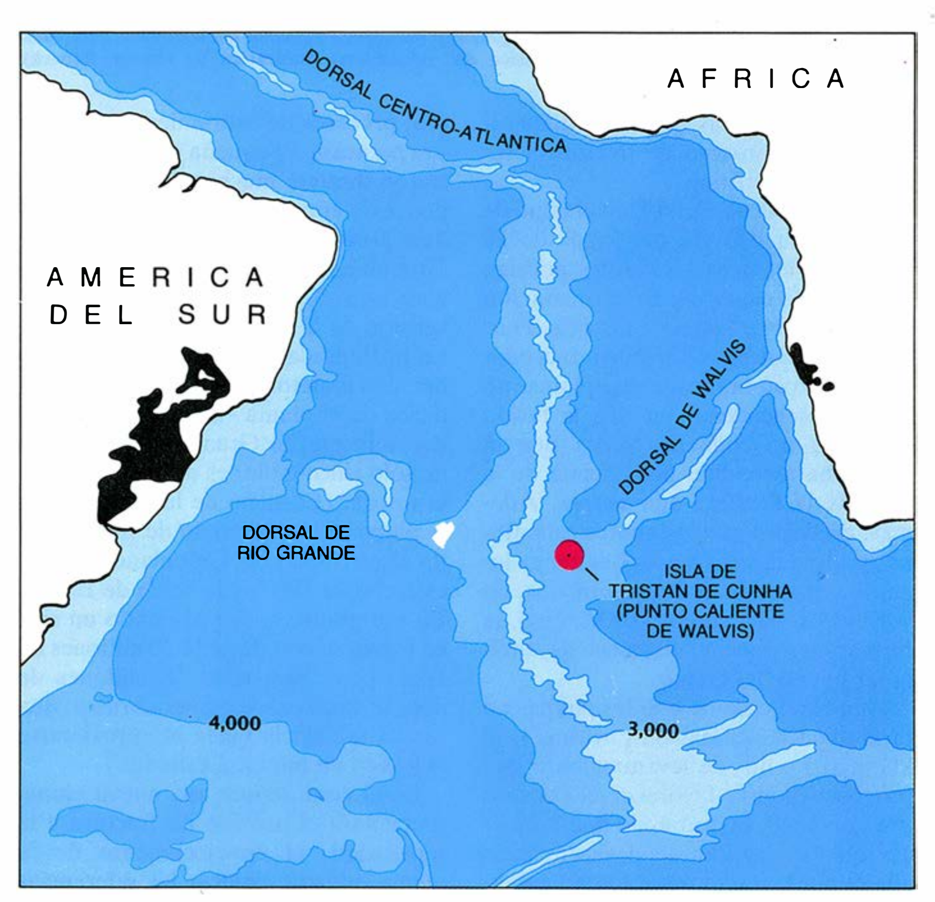
Basaltos de avenida comparables a aquéllos se extienden, tierra adentro, desde las costas atlánticas de Sudamérica y de Africa; a lo largo de estas costas, los perfiles sísmicos revelan la existencia de capas ígneas características de un margen volcánico. El Atlántico sur comenzó a abrirse, hace unos 125 millones de años, entre las dos masas continentales a partir de su extremo meridional. Al igual que una cremallera que se abre, el punto de separación se desplazó a ritmo constante hacia el norte, completándose el proceso en unos cinco millones de años. Durante ese intervalo, el punto caliente de Walvis, una anomalía térmica, se hallaba debajo mismo de la parte central del rift. La descompresión sobre la anomalía térmica liberó ingentes volúmenes de lava sobre Africa y aún más –tal vez dos millones de kilómetros cúbicos– sobre Sudamérica, donde colmató valles con profundidades de hasta 300 metros, para rebasarlos y continuar adelante. No se tiene tanto conocimiento de la datación de estas erupciones como en el caso de los Traps de Deccan, pero el vulcanismo parece haber durado sólo un corto tiempo y haber alcanzado su punto culminante hace unos 121 o 120 millones de años, justo cuando se separaban los bloques continentales.

Un ejemplo todavía más antiguo de basaltos de avenida relacionados con la separación volcánica data de la ruptura y separación de Gondwana, el supercontinente que comprendía Africa, la Antártida, Sudamérica, la India y Australia. Hace unos 170 millones de años, apareció un rift entre Africa y la Antártida, sobre una pluma situada hoy en el océano Indico meridional. La fusión por descompresión originó la secuencia volcánica, de una potencia de 10 kilómetros, descubierta recientemente en las costas de la Antártida, y basaltos de avenida ("plateau") que demuestran que la lava se adentró profundamente en el continente.

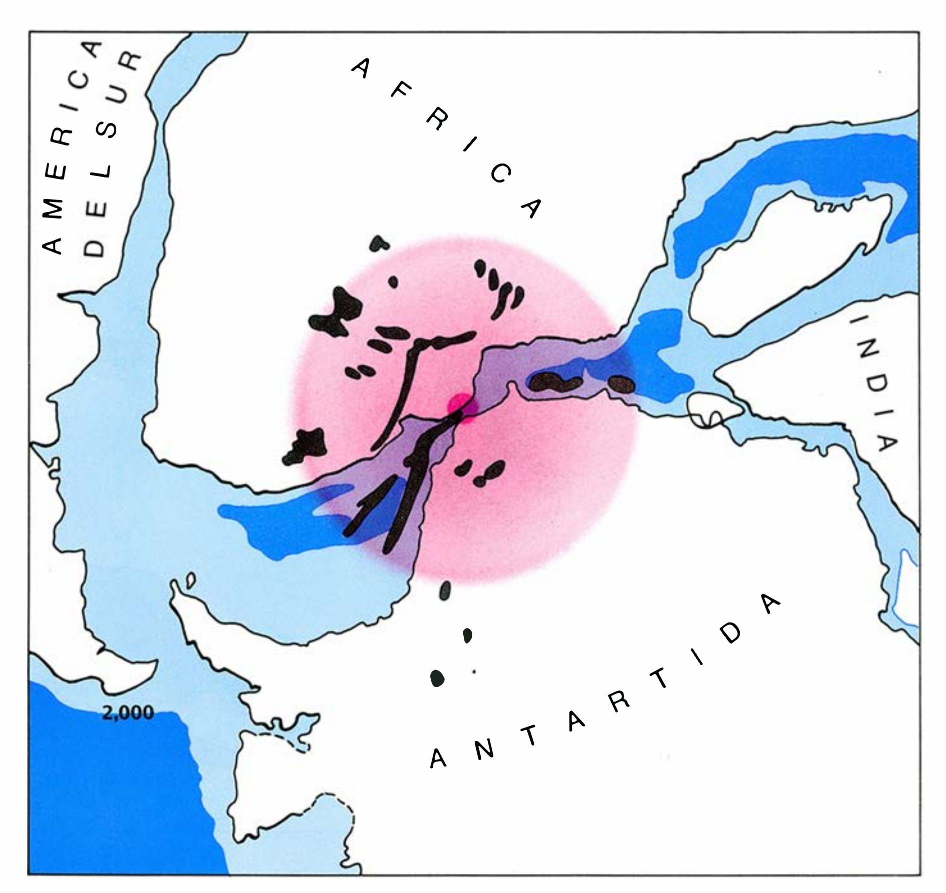
Plumas y procesos de fractura y separación

Hemos supuesto que estos ingentes volúmenes de magma se generan de forma pasiva, en respuesta al estiramiento y al fraccionamiento de la litosfera. En realidad, el manto desempeña un papel muy activo: para que se produzcan tales volúmenes de fundido, un material insólitamente caliente deberá haber ascendido en penacho desde el manto, donde estaba a gran profundi-





8. EL ATLANTICO SUR hace 120 millones de años después de abrirse el rift entre América del Sur y Africa (*arriba*), cuando el océano comenzó a penetrar hacia el norte. El punto caliente de Walvis contactó con el rift; la región asociada de manto caliente abarcaba los márgenes volcánicos que produjeron los basaltos de avenida durante la fractura y separación continental. El punto caliente se encuentra ahora debajo de la isla de Tristan da Cunha, en la dorsal centro-atlántica (*abajo*); las estelas que el punto caliente dejó en ambas placas divergentes, en forma de anchas dorsales volcánicas, registran el curso de las placas.



9. DESMEMBRACION DE GONDWANA, supercontinente que incluía muchos de los bloques continentales actuales. El proceso de ruptura comenzó hace ciento setenta millones de años, cuando se abrió un rift entre Africa y la Antártida. Grandes extensiones de basaltos de avenida erosionados en ambos continentes y capas de basalto en las costas de la Antártida registran el vulcanismo disparado por la ruptura. Una pluma y su anomalía térmica explican la extensión del vulcanismo. (Ilustración de George Retseck).

dad. ¿Podrían las plumas, además, controlar el proceso de fractura y separación, de "rifting"?

J. Tuzo Wilson, de la Universidad de Toronto, sugirió ya, hace más de 20 años, que los puntos calientes podrían constituir la causa del fraccionamiento de la litosfera e inicio de los rifts. Pero el fundido que se ve forzado a ascender hasta la litosfera, desde una pluma, no puede desencadenar un rift: la fusión extensiva no comienza hasta que el manto ha ascendido por encima de la base de la litosfera aún entera. Además, está claro que los puntos calientes no resultan decisivos para que tenga lugar la separación: bordes normales, no volcánicos, tales como el de Vizcaya, se formaron a mucha distancia de cualquier pluma del manto.

Aún en el caso de que las plumas no produzcan la separación ("rifting"), el kilómetro o dos de levantamiento que provocan podría favorecer el proceso por gravedad, permitiendo que las placas que se separan se deslicen hacia abajo, por los lados opuestos del abombamiento. La actividad de una pluma pudiera muy bien haber sido, pues, el factor crucial para el comienzo de los rifts. En el Atlántico norte, por ejemplo, procesos de estiramiento, fractura y separación a pequeña escala se registraron durante muchas decenas de millones de años antes de que se desarrollara plenamente un rift oceánico entre Groenlandia y el norte de Europa, hace unos 57 millones de años. La ascensión de la pluma de Islandia desde las profundidades del manto pudo haber sido el detonante. Los primeros indicios de la pluma –las coladas de lava del noroeste de Gran Bretaña– datan de sólo cinco millones de años antes de la rotura. (El inicio de la actividad de la pluma está registrado de forma nítida al otro lado de Groenlandia, en el estrecho de Davis y la bahía de Baffin. En ese punto, se fue abriendo un rift, de forma suave, durante 30 millones de años; pero hace unos 58 millones de años se extruyó, de manera brusca, una espesa secuencia ígnea al aproximarse el hongo de material caliente.)

En el caso de que una nueva pluma precipitara el proceso de fractura y la separación, el envejecimiento de la pluma pudiera explicar las diferencias en espesor entre la mayoría de los bordes separados y la corteza oceánica adyacente. En el Atlántico norte, por ejemplo, las capas ígneas de los bordes separados tienen una potencia superior a los 15 kilómetros. Estos pasan gradualmente a corteza oceánica, generada tras la apertura del rift, con una potencia de 10 a 12 kilómetros: más espesa que la corteza oceánica normal, pero menos de lo que cabría esperar si la temperatura del manto se hubiese mantenido constante. Al fin y al cabo, la pluma de Islandia permanece aún debajo mismo de la dorsal centro-atlántica.

La disminución en espesor de la corteza, o, en equivalencia, del volumen de magma liberado en el rift, refleja probablemente la estructura de la pluma. Los modelos de ordenador sugieren que las plumas del manto se inician con una bolsa de material cuya temperatura es tal vez superior en 50 o 100 grados la del flujo estable posterior. Además, esta masa globular, que constituye el sombrerillo del hongo, tiene un radio mayor que la pluma que le sigue. Es de esperar que la temperatura más elevada y el mayor volumen de material que alcanza la parte superior del manto, a medida que se abriera el rift, favorecieran los procesos iniciales de fusión y explicaran la potencia excepcional de los bordes ígneos. Debería seguir a continuación una corteza oceánica menos gruesa, conforme la masa caliente inicial cediera el paso al flujo constante de la pluma.

Crecimiento de los continentes

Cada vez que se rompe y separa un continente cerca de una pluma caliente, se libera tanto material fundido que resulta obligado suponer que el vulcanismo de los rifts desempeña un papel mucho más importante en la evolución del planeta del que se le venía otorgando. Puede que el proceso ofrezca, por ejemplo, una respuesta parcial a la pregunta de cómo se construyeron los continentes. Nuestro modelo de producción de magma, junto a las pruebas del Atlántico norte y sur y la de la India, muestra que se liberan unos 10 millones de kilómetros cúbicos de roca fundida cada vez que se separa un continente cerca de una pluma caliente. Al discurrir sobre la corteza continental y emplazarse bajo las placas, el material ígneo incrementa el volumen de los bloques continentales.

Estimamos que un episodio volcánico de fractura y separación ha tenido lugar, por término medio, cada 30 millones de años. Por tanto, durante épocas recientes, el proceso ha podido venir añadiendo, por término medio, un tercio de kilómetro cúbico de material

a los continentes cada año. En los comienzos de la historia de la Tierra, el manto hubo de tener una temperatura más elevada que la actual, con lo que la separación y compresión habrían generado, por tanto, mayor volumen de material fundido. La tasa media de crecimiento de los continentes, desde la formación de la Tierra, ha sido, tal vez, de un kilómetro cúbico al año; por ello, los rifts volcánicos pudieron haber constituido la fuente principal del crecimiento temprano de los continentes. El principal problema de la propuesta es el elevado contenido en óxido de magnesio de los fundidos liberados en los rifts volcánicos, que no concuerda con la composición observada en la corteza continental o con las propiedades sísmicas de ésta.

Sea cual fuere su papel exacto en la historia de la Tierra, estos episodios volcánicos pueden ocupar su lugar junto con otros procesos geológicos, dentro del marco del actualismo: la idea según la cual el pasado geológico puede explicarse mediante los mismos fenómenos que están conformando hoy la Tierra. La escala sin parangón de determinadas erupciones, entre las que destacan los basaltos de Traps de Deccan, ha llevado a que algunos autores las atribuyan a causas ajenas a los procesos terrestres normales; impacto de asteroides, por ejemplo. Pero, en nuestra opinión, no se requieren tales catástrofes. Las potentes secuencias marinas de rocas ígneas, los basaltos de avenida continentales y, tal vez, las propias extinciones en masa pueden explicarse, todos ellos, por la acción de procesos terrestres conocidos y aún en curso.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

ANOMALOUS HEAT FLOW AND GEOID ACROSS THE CAPE VERDE RISE: EVIDENCE FOR DYNAMIC SUPPORT FROM A THERMAL PLUME IN THE MANTLE. R. C. Courtney y R. S. White en *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, vol. 87, n.º 3, págs. 815-867; diciembre de 1986.

MAGMATISM AT RIFTED CONTINENTAL MARGINS. Robert S. White, George D. Spence, Susan R. Fowler, Dan P. McKenzie, Graham K. Westbrook y Adrian N. Bowen en *Nature*, vol. 330, n.º 6147, págs. 439-444; diciembre de 1987.

THE VOLUME AND COMPOSITION OF MELT GENERATED BY EXTENSION OF THE LITHOSPHERE. D. McKenzie y M. J. Bickle en *Journal of Petrology*, vol. 29, n.º 3, págs. 625-679; junio de 1988.

MAGMATISM AT RIFT ZONES: THE GENERATION OF VOLCANIC CONTINENTAL MARGINS AND FLOOD BASALTS. R. White y D. McKenzie en *Journal of Geophysical Research*, vol. 94, n.º B6; junio de 1989.

El tracto gastrointestinal durante el crecimiento y la reproducción

El tracto gastrointestinal, la glándula endocrina de mayor tamaño del organismo, desempeña una función esencial en los reajustes metabólicos propios del embarazo, crecimiento fetal y primera infancia

Kerstin Uvnäs-Moberg

El tracto gastrointestinal parece, a primera vista, una simple cavidad larga y tortuosa, en la que se introduce la comida para ser digerida y dar lugar a moléculas que puedan ser absorbidas a través de sus paredes y entrar en la circulación sanguínea. En realidad, el tubo digestivo es mucho más que esto. Se trata de la mayor glándula endocrina que posee el organismo y segrega un conjunto de hormonas que ejercen profundos efectos, no sólo en la propia digestión, sino también en el metabolismo de los nutrientes ingeridos e incluso en las emociones y en la conducta.

Durante el crecimento y la reproducción, estas funciones resultan más decisivas que en ningún otro período vital. Todos los organismos necesitan más alimento durante las fases de crecimiento. Los animales jóvenes de diferentes especies comen, en proporción, más que los adultos. Durante la primera infancia, los niños ingieren cuatro veces más calorías por kilogramo de peso corporal que los adultos. La demanda de alimento es también elevada en organismos en fase de reproducción, que, a menudo, va precedida por un período en el que se halla incrementada la ingesta y el almacenamiento de energía. Es tan importante la nutrición para la reproducción, que ésta no tiene lugar sin un aporte adecuado de alimento.

En los mamíferos, incluida la especie humana, la mayor parte de la tarea reproductora la lleva a cabo la hembra. La mujer difiere del hombre, en cuanto al crecimiento, en el sentido de poder experimentar, además de la fase característica de crecimiento propia de la infancia y la adolescencia, fases adicionales durante la vida adulta, coincidiendo con los embarazos. Al comienzo del embarazo, la mujer gana peso, almacenando energía en forma de grasas frente a la demanda del feto y en preparación para los elevados requerimientos energéticos propios de la lactancia. En el organismo humano, la ingesta y el almacenamiento de energía guardan también relación con la capacidad reproductora. Si una mujer ha adelgazado en demasía por culpa del hambre, el ayuno o el exceso de ejercicio físico, no puede ovular y es infértil [véase "Obesidad y fertilidad", por Rose E. Frish; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, mayo de 1988].

Por constituir el incremento en la nutrición una exigencia para el crecimiento y digerirse los alimentos en el tracto gastrointestinal, el estómago y los intestinos deben funcionar en condiciones óptimas durante los períodos de reproducción y de crecimiento intenso. Ello es posible gracias a una compleja reorquestación de la actividad de las hormonas gastrointestinales. En mi laboratorio del Instituto Karolinska de Estocolmo y en muchos otros laboratorios, se han estudiado las interacciones entre dichas hormonas durante el embarazo, en el feto, en la primera infancia y tanto en la madre como en el niño durante la lactancia.

Para valorar la función que el tracto gastrointestinal desempeña durante el crecimiento y la reproducción, conviene considerar primero las funciones normales de las hormonas gastrointestinales. Las hormonas son polipéptidos, cortas cadenas de 10 a 100 aminoácidos, sintetizados en células endocrinas especializadas que proyectan su ribete en cepillo o *microvilli* hacia el estómago o intestino delgado. Después de una comida, células de distintos tipos detectan, bien la distensión de la pared del tubo digestivo, bien la presencia de nutrientes o el *p*H bajo (acidez). En virtud de esos estímulos, se produce la secreción de hormonas que actúan localmente en el propio tracto gastrointestinal y en la circulación sanguínea. La actividad de las células endocrinas del tubo digestivo se halla también controlada por el sistema nervioso vegetativo. La activación del nervio vago, perteneciente al sistema nervioso parasimpático, promueve la liberación de hormonas que refuerzan la digestión; la activación del nervio esplácnico, perteneciente al sistema nervioso simpático, ejerce el efecto opuesto al anterior.

Las hormonas influyen, a su vez, sobre la motilidad y la secreción de enzimas digestivas y de ácido. Así, la hormona gastrina, producida en la porción distal del estómago, activa la digestión estimulando la motilidad y la secreción de jugo gástrico. Otra hormona, químicamente relacionada con la anterior, la colecistocinina, segregada en la porción proximal del intestino delgado, inhibe la evacuación gástrica, favoreciendo la digestión y la absorción de nutrientes en la circulación; también estimula la liberación de bilis almacenada en la vesícula biliar y la secreción de enzimas pancreáticas. La hormona secretina, producida en la misma área, estimula la secreción pancreática de bicarbonato (que neutraliza el jugo gástrico). Recientemente se ha demostrado que dichos polipéptidos también estimulan el crecimiento de los órganos

KERSTIN UVNÄS-MOBERG es profesora del departamento de farmacología del Instituto Karolinska de Estocolmo, donde se doctoró en 1976. Nos cuenta que, después de estudiar la fisiología del sistema endocrino gastrointestinal durante 10 años, y tras cuatro embarazos, "no pude resistirme ante el reto de abordar la relación entre la teoría y la práctica".

sobre los que actúan; en concreto, instan el crecimiento en grosor de la mucosa del tubo digestivo. En otras palabras, actúan como hormonas del crecimiento en el tracto gastrointestinal.

Una hormona gastrointestinal que no estimula las funciones digestivas es la somatostatina. Este polipéptido, identificado originalmente en el hipotálamo, se produce también, lo sabemos hoy, en el tracto gastrointestinal, donde abundan células secretoras en el estómago y en la porción proximal del intestino delgado.

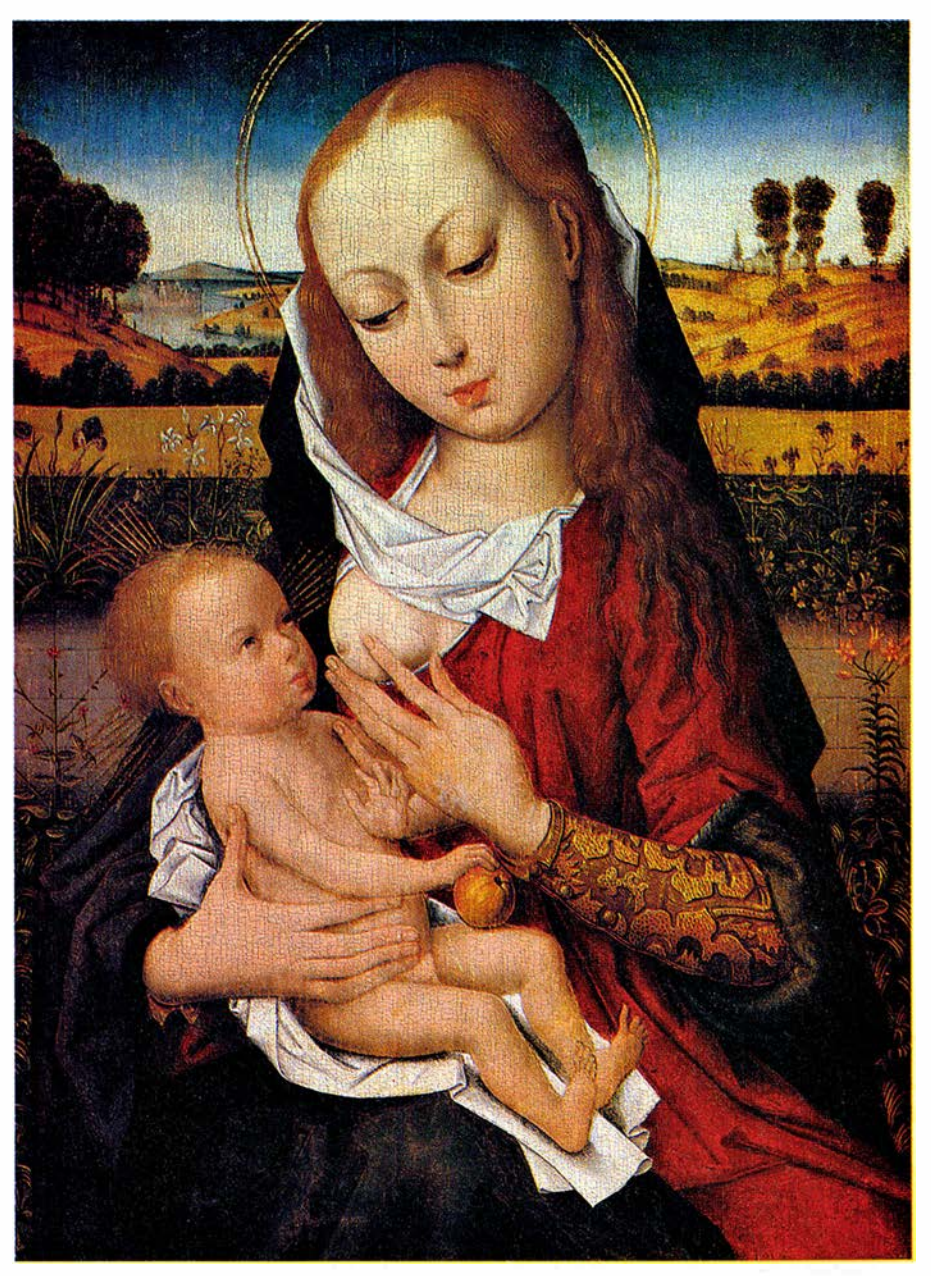
La somatostatina ejerce un profundo efecto inhibidor en el tubo digestivo. Tiende, por ejemplo, a disminuir la motilidad gastrointestinal y a bloquear la secreción de ácido clorhídrico en el estómago, la evacuación de bilis de la vesícula, la absorción de nutrientes a través de la pared intestinal e incluso la liberación de hormonas como la gastrina y la colecistocinina. La somatostatina contrarresta el efecto activador del crecimiento que la gastrina y la colecistocinina ejercen sobre el tracto gastrointestinal. Habida cuenta de su carácter inhibidor, la hormona somatostatina ejerce su control nervioso de forma opuesta al de las hormonas activadoras: el nervio vago inhibe la liberación y el esplácnico la estimula.

Una vez absorbidos, los alimentos ingeridos pueden metabolizarse esencialmente a través de dos mecanismos. Pueden entrar en las vías anabólicas, en las que a partir de pequeñas moléculas se sintetizan moléculas mayores que contribuyen al crecimiento o se almacenan en el organismo para su posterior utilización; o, por el contrario, los nutrientes se degradan en un proceso denominado catabolismo, para proporcionar energía. Cuando hay una fuerte demanda energética, pensemos en el ejercicio físico o en el estrés psicológico, la energía se moviliza mediante reacciones catabólicas en los tejidos hepático, muscular y adiposo, en respuesta a la actividad del sistema nervioso simpático y de la glándula adrenal.

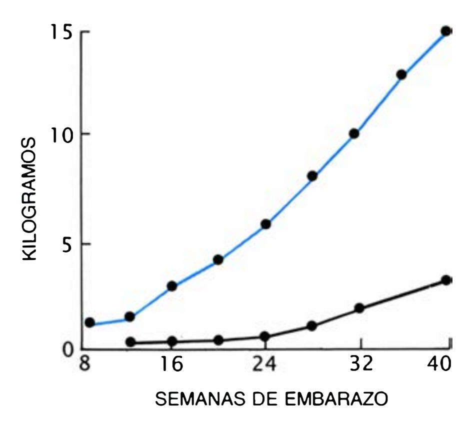
En contraste con la situación anterior, el anabolismo predomina después de la ingestión de alimentos, depositándose la energía para su uso ulterior en el hígado y en el tejido adiposo. Esa acumulación de nutrientes viene estimulada por la acción de la insulina, hormona pancreática que se segrega cuando los niveles sanguíneos de glucosa aumentan después de la digestión. La ingestión de alimentos promueve también la actividad del sistema nervioso parasimpático y, en consecuencia, la actividad endocrina del tracto digestivo. Varias hormonas gastrointestinales, entre ellas la gastrina, la colecistocinina y la secretina, incrementan la secreción de insulina inducida por la glucosa, aumentando adicionalmente el anabolismo. La somatostatina, por otra parte, parece inhibir la captación de nutrientes y su almacenamiento.

El hecho de que las hormonas gastrointestinales ejerzan una importante influencia en el metabolismo queda perfectamente ilustrado con algunos datos evolutivos. Sture Falkmer, del Instituto Karolinska, ha demostrado que el páncreas, que sintetiza insulina, deriva del intestino. En los vertebrados primitivos, que carecen de un páncreas individualizado, la insulina la producen células endocrinas de la pared intestinal y se libera a la circulación como consecuencia del contacto directo entre dichas células y el contenido intestinal.

Las hormonas gastrointestinales provocan efectos psicológicos, además de sus conocidos efectos metabólicos. Durante el estrés, se produce un incremento del catabolismo y la actitud de alerta característica de la vigilia resulta incrementada. Durante la digestión, por otra parte, cuando se están almacenando los nutrientes, la persona tiene a menudo una sensación de somnolencia y de bienestar. Tales fenómenos psicológicos posprandiales tienen su origen, en parte, en el tracto gastrointestinal. La colecistocinina,



1. MADRE AMAMANTANDO A SU HIJO en la pintura flamenca *La Virgen María y el Niño*, de finales del siglo XV. El cuadro, del Maestro de la Vida de Santa Catalina, se expone en el Museo Nacional de Estocolmo. Según se ha demostrado, la lactancia promueve una simbiosis madre-hijo regulada por vía hormonal.



2. LA MUJER GESTANTE comienza a almacenar grasas y ganar peso (*curva en color*) durante el primer trimestre, cuando la ingesta es relativamente pequeña y antes de que el peso del feto (*curva en negro*) sea apreciable. Los datos representan valores promedio de una muestra de mujeres suecas.

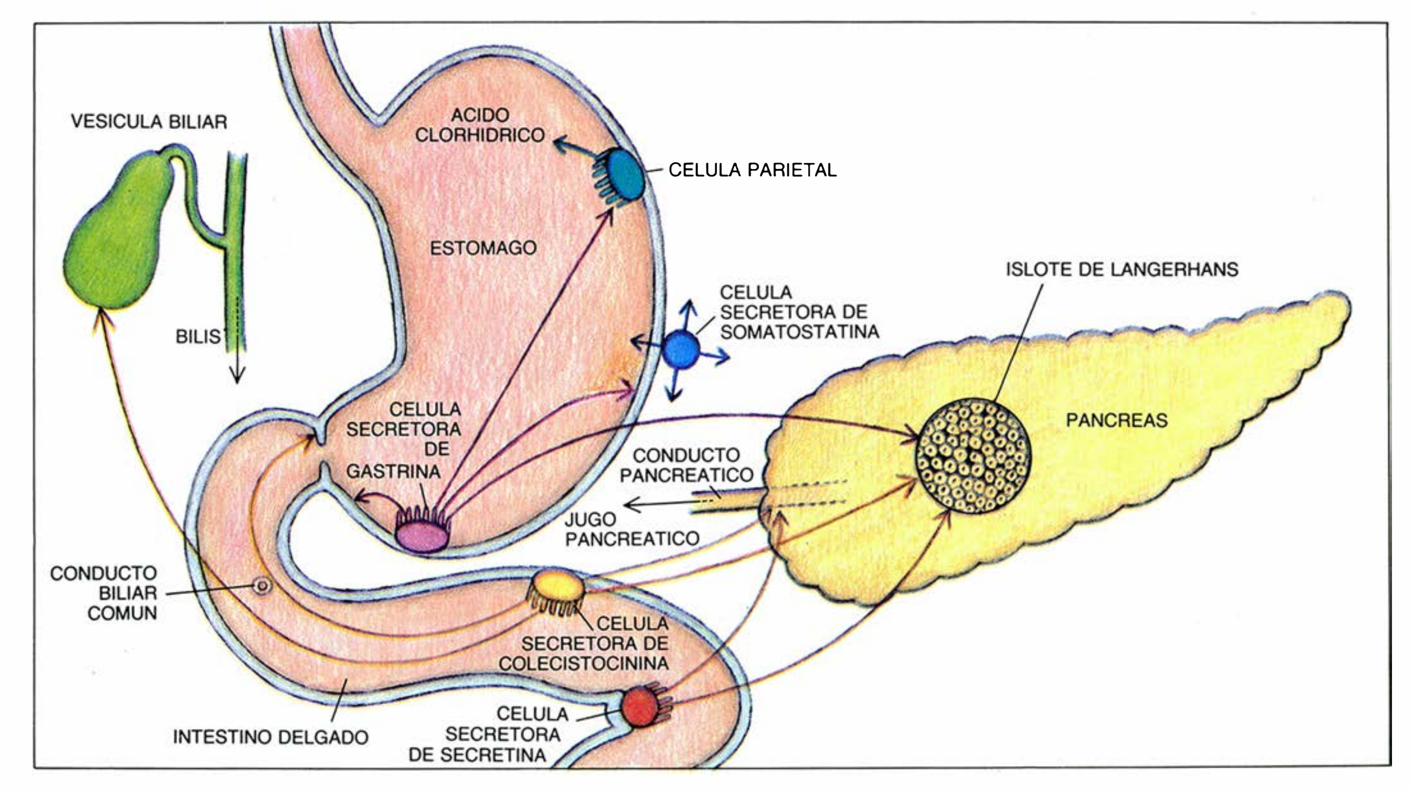
cuando se inyecta en las ratas, inhibe la ingestión de alimentos; Robert S. Mansbach y sus colaboradores, de la Universidad de Vermont en Burlington, han observado que la inyección de la hormona en las ratas puede provocar incluso el patrón electroencefalográfico característico del sueño. La sección del nervio vago elimina el efecto inhibidor de la colecistocinina en la ingesta de alimentos, lo que sugiere que, al menos en la rata, la información discurre desde el tubo digestivo hasta el cerebro por vía neural.

La actividad normal del tracto gastrointestinal cambia durante el embarazo, modificación que constituye un factor importante en el incremento de peso característico de ese estado. Los estudios desarrollados en centros de maternidad de Suecia han demostrado que, como término medio, se produce durante el embarazo un incremento de peso de 15 kilogramos. Parte del incremento se debe al peso del feto, al crecimiento del útero y al aumento del volumen de sangre, pero cuatro kilogramos por lo menos se deben al depósito de grasas.

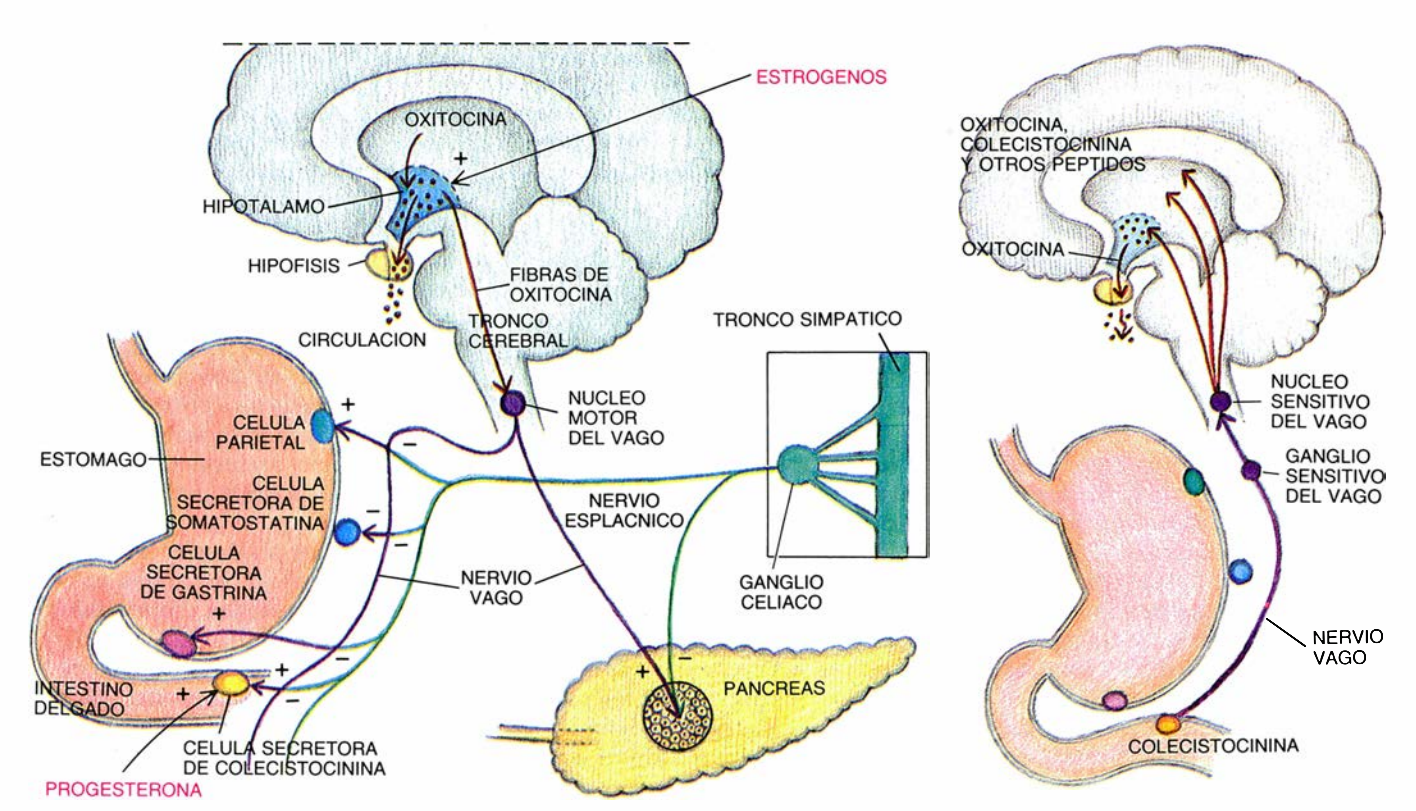
La explicación más sencilla del incremento de peso durante el embarazo reside, sin duda, en el aumento de la ingesta (como indica el dicho popular "come por dos"). En realidad, el aumento de la ingesta sólo es parcialmente responsable. Según expusimos antes, el aumento de peso tiene lugar ya en el primer trimestre del embarazo, cuando la sensación subjetiva de malestar determina una disminución de la ingesta más que un aumento. Por tanto, otros mecanismos fisiológicos habrá implicados; resulta hoy evidente la intervención decisiva de las hormonas gastrointestinales.

Mi grupo, entre otros, ha demostrado que la secreción posprandial de colecistocinina aumenta en las mujeres embarazadas. Los experimentos realizados con perras gestantes demostraron incrementos del nivel plasmático medio de colecistocinina. La elevación es máxima durante el primer tercio del embarazo; luego, declina gradualmente, pero permanece elevada sobre el nivel normal hasta el parto.

Los cambios en los niveles de hormonas gastrointestinales tienen varias consecuencias. El incremento de la colecistocinina y la disminución de la somatostatina inhibidora aumentan el rendimiento de la función digestiva. En segundo lugar, se favorece el anabolismo y se estimula el incremento de peso, debido, por una parte, al mayor nivel de las hormonas que potencian la liberación de insulina inducida por glucosa y, por otra, al descenso del nivel de somatostatina. Finalmente, la elevación posprandial de la colecistocinina es presumible responsable, vía del nervio vago hasta el cerebro, de la sensación de somnolencia y cansancio que, sobre todo después de las comidas, caracteriza el comienzo del embarazo. La sensación de fatiga tiene un efecto adaptativo: tiende a reducir la actividad física, con lo que se ahorra energía y ésta puede ser almacenada. (Por supuesto, muchas mujeres de las sociedades industrializadas siguen trabajando durante casi todo el embarazo. La fisiología sugiere que quizá no sea ésta la conducta ideal.)



3. HORMONAS GASTROINTESTINALES, segregadas en el tubo digestivo y en la circulación sanguínea por células endocrinas. La gastrina, colecistocinina y secretina fomentan la secreción pancreática de insulina. La gastrina estimula la secreción de jugo gástrico, el crecimiento de la mucosa y la motilidad gástrica. La colecistocinina retrasa el vaciamiento gástrico y estimula la evacuación de bilis por la vesícula biliar y la secreción pancreática de enzimas digestivas. La secretina aviva la secreción pancreática de bicarbonato. La somatostatina inhibe la secreción de hormonas gastrointestinales y contrarresta sus efectos.



4. CONTROL NEURAL de las hormonas gastrointestinales: corre a cargo de los nervios vago y esplácnico. Las fibras vagales, activadas en parte por la oxitocina, estimulan (+) o inhiben (−) la secreción de hormonas gastrointestinales y la secreción pancreática de insulina; los impulsos que discurren por el nervio esplácnico ejercen efectos opuestos. Los elevados niveles de estrógenos durante el embarazo estimulan la secreción de oxitocina, potenciando los efectos vagales sobre la producción de hormonas gastrointestinales y la liberación de insulina; la progesterona, por su lado, actúa localmente incrementando la liberación de colecistocinina.

5. SEÑALES NERVIOSAS transmitidas desde el tubo digestivo al cerebro. La colecistocinina del intestino delgado desencadena impulsos en las terminaciones sensitivas del vago, que pasan, a través de este nervio, al cerebro: promueven la conducta materna y las sensaciones de saciedad y somnolencia.

El comienzo del embarazo se distingue no sólo por la fatiga, sino también por otros síntomas molestos: hambre intensa, sensaciones de náusea, presión arterial baja y vértigo. La relación del tracto gastrointestinal con tales síntomas es obvia. La sensación de hambre y el vértigo pueden asociarse con la caída de la glucemia, causada en parte por la liberación de insulina activada por la colecistocinina y otras hormonas gastrointestinales. Las náuseas y molestias gástricas son probablemente resultado del retraso de la evacuación gástrica provocado por los niveles altos de colecistocinina.

¿Cuál es la causa de los cambios del sistema endocrino gastrointestinal durante el embarazo? La hiperactividad del nervio vago, que, como se ha indicado, modula la secreción de hormonas gastrointestinales, puede ser uno de los factores determinantes. Koji Takeuchi, de la Facultad de Farmacia de Kyoto, en Japón, ha demostrado que la sección del nervio vago en ratas gestantes reduce drásticamente la habitual hipersecreción de jugos digestivos, como el ácido clorhídrico.

¿A través de qué mecanismo tiene esto lugar? La actividad vagal se ve afectada, entre otros factores, por un pequeño neuropéptido, la oxitocina, sintetizado por núcleos del hipotálamo. Algunas de las fibras de las neuronas productoras de oxitocina llegan a la hipófisis posterior, donde segregan el péptido a la circulación; otras fibras conectan con el núcleo motor del vago situado en el tronco cerebral y estimulan el nervio vago [*véase la figura 4*]. La secreción de oxitocina resulta notablemente incrementada por los estrógenos; estas hormonas esteroideas aumentan su concentración durante el embarazo. La liberación de hormonas gastrointestinales puede verse afectada localmente por la acción de los estrógenos y de otra hormona esteroidea, la progesterona.

Después de una larga evolución, el organismo humano actual ha heredado un material genético que reúne la información de numerosas adaptaciones que desarrollaron nuestros predecesores. Durante milenios, cualquier mecanismo fisiológico que implicara un incremento de la energía disponible durante el embarazo habría resultado decisivo para la gestación y el desarrollo de niños sanos, sobre todo en situaciones de escasez de alimentos. En las sociedades industriales avanzadas, donde la mayoría de los ciudadanos disfrutan de alimentos en abundancia, la capacidad de la mujer embarazada para reducir el gasto energético continúa manifestándose, pero tiende a experimentarse sólo en su aspecto negativo, como síntomas de malestar y riesgo de obesidad. En un sentido más amplio, la facilidad con que muchas mujeres aumentan de peso y la mayor tendencia a la obesidad respecto al sexo masculino podrían reflejar una capacidad latente de la mujer de almacenar energía en relación con la procreación, que se expresa en grado máximo durante los períodos de actividad reproductora.

Al incremento de peso durante el embarazo lo supera, de lejos, el que experimenta el lactante: el peso del recién nacido se duplica en seis meses. La ingesta de alimentos es proporcionalmente elevada. A las seis semanas, un lactante que pesa unos cuatro kilogramos, bebe unos 650 centímetros cúbicos de leche al día; ¡para una persona adulta de 65 kilogramos el equivalente sería un volumen de 10 litros! La ingesta media de calorías en la primera infancia cuadruplica, en kilogramos de peso, la de los adultos. El tracto gastrointestinal debe estar suficientemente desarrollado y activo para poder asimilar la cantidad de alimentos y calorías ingeridos durante la infancia. La

mayoría de los nutrientes están destinados al anabolismo necesario para el crecimiento; por ello, se espera encontrar los mecanismos endocrinos que estimulan la secreción de insulina particularmente activos.

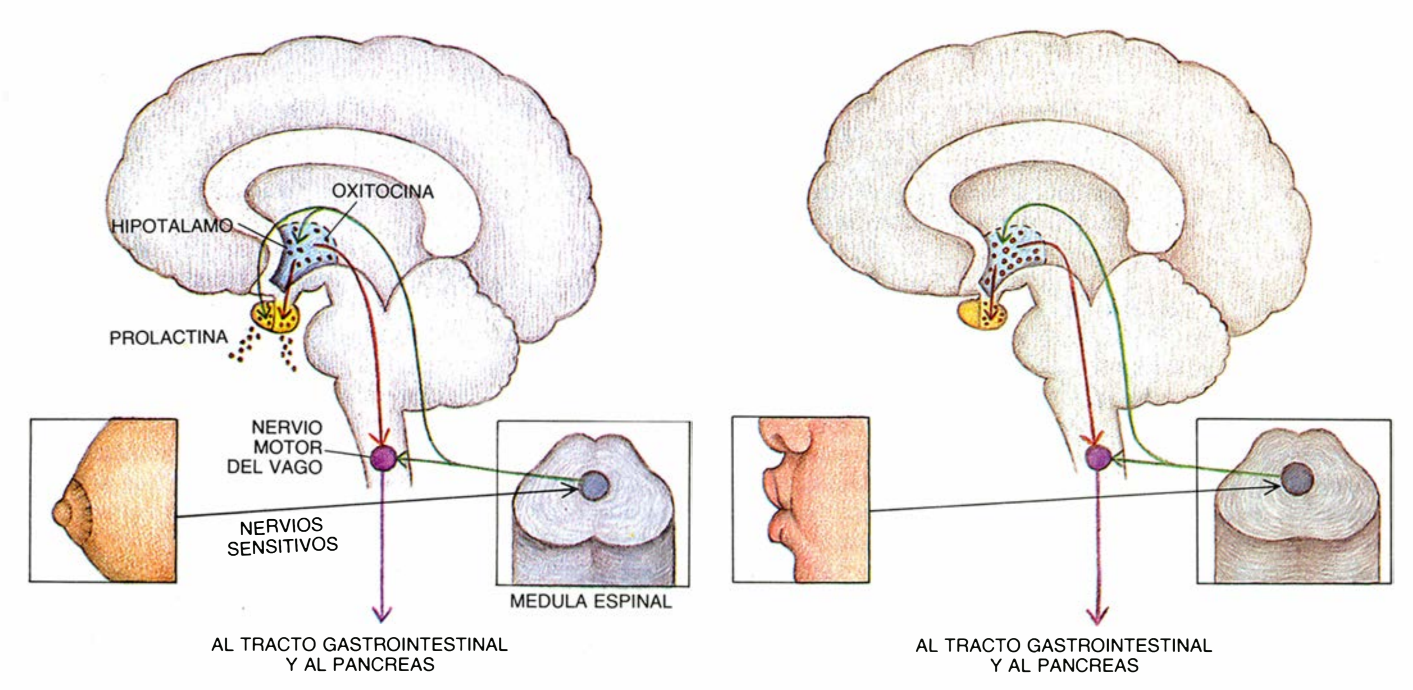
Confirmando esta hipótesis, los niveles de gastrina son del orden de cinco a diez veces superiores en los recién nacidos que en el adulto, según han demostrado Alan Lucas, de la Unidad Dunn de Nutrición del Consejo de Investigación Médica de Cambridge, A. Aynsley-Green, de la Universidad de Oxford, y mi propio grupo. Los elevados niveles de gastrina de los recién nacidos no cabe atribuirlos a una gran ingesta de alimentos. El infante ingiere, de hecho, muy poca leche en los primeros días de lactancia y, por tanto, los elevados niveles de gastrina preceden a la ingesta elevada de alimento característica de la primera infancia.

Los niveles altos de gastrina del recién nacido pueden explicarse, al menos en parte, por la previa estimulación, durante la vida fetal, de la función gastrointestinal. Aunque la nutrición del feto procede de forma pasiva a través del cordón umbilical, el tracto gastrointestinal fetal recibe un "entrenamiento" en el útero para su futura tarea de digerir los alimentos. Se sabe que ocasionalmente el feto ingiere líquido amniótico. La ecografía ha mostrado movimientos de deglución ya durante el primer trimestre del embarazo, según las observaciones de Heinz F. R. Prechtl, de la Universidad estatal de Groningen en los Países Bajos. El líquido amniótico contiene diferentes sustancias, entre las que cabe destacar el factor de crecimiento epidérmico y la gastrina, que estimulan la maduración gastrointestinal.

La importancia de la ingestión de líquido amniótico para el desarrollo del tracto gastrointestinal del feto fue demostrada por Sean J. Mulvihill, de la facultad de medicina de la Universidad de California en Los Angeles. Después de ligar el esófago de fetos de conejo, se observaba un bloqueo notable del desarrollo del tubo digestivo; el crecimiento normal se restablecía tras introducir líquido amniótico bovino en el tracto gastrointestinal de los fetos. Ann-Marie Widström, Jan Winberg y la autora examinaron el contenido gástrico de recién nacidos. De nuestros datos se puede concluir que los períodos de ingestión de líquido amniótico van seguidos de una secreción de gastrina fetal, somatostatina y ácido gástrico: a tenor de lo que se ve, se liberan dichas sustancias, incluso en la vida intrauterina, con una cronología parecida a la que se observa en el recién nacido en el período posprandial.

Una segunda causa de los niveles elevados de gastrina en el recién nacido podría residir en la succión. Al estimular nervios sensoriales de la cavidad bucal del lactante, desencadena la activación del vago y, consecuentemente, la liberación de gastrina y otras hormonas gastrointestinales. Giovanna Marchini y la autora han seguido el curso de la liberación de hormonas gastrointestinales inducida por la succión; hemos determinado sus niveles plasmáticos. Cuando el lactante es amamantado, se elevan sus niveles plasmáticos de gastrina, colecistocinina e insulina. Un primer pico parece depender del nervio vago; es curioso que el mismo efecto se produzca con un chupete. Una segunda respuesta hormonal, más lenta, se desata ante la presencia de alimentos en el estómago y en el intestino, pero es probablemente aumentada como consecuencia de la actividad vagal inducida por el reflejo de succión.

Hay razones poderosas para sospechar que el reflejo de succión ejerce, por sí mismo, notables efectos fisiológicos y psicológicos. Judy C. Bernbaum, de la facultad de medicina de la Universidad de Pennsylvania, ha observado que los lactantes que necesitan alimentarse a través de un catéter nasal crecen más deprisa, con la misma cantidad de calorías, si utilizan un chupete durante la intubación. Tanto la lactancia materna como la utilización del chupete producen en el niño un efecto sedante y somnolencia, por la razón presumible de que la succión aviva la secreción de colecistocinina. Se oye decir a veces que los chupetes son poco higiénicos y "malcrían" al bebé. Muy al contrario, la utilización del chupete puede tener un claro sentido fisiológico. De hecho, el patrón primitivo con que se amamantaba a los lactantes, y



6. LA SUCCION estimula las terminaciones sensitivas del vago en el pezón materno (*izquierda*) y las de la cavidad bucal del lactante (*derecha*). Los impulsos vagales incrementan los niveles de prolactina y oxitocina en la madre, proceso que favorece la producción y el flujo de leche; modifican, además, los niveles de hormonas gastrointestinales en la madre y en el lactante, coordinando de esta forma sus metabolismos. (Los dibujos han sido realizados por Patricia Wynne.)

que aún se observa en algunas tribus, incluye varios períodos de succión por hora, día y noche. El chupete puede suplir esta costumbre y compensar la reducción de los períodos de succión derivados del rígido patrón horario en uso.

En diferentes enfermedades infantiles, con independencia de su causa, se observa una disminución del crecimiento y síntomas gastrointestinales: retención gástrica, estreñimiento e incluso vómitos. Marchini, Winberg y la autora han comprobado que los niños enfermos muestran niveles de somatostatina 10 veces superiores que los niños sanos. En períodos de estrés (incluido el causado por la enfermedad), se activa el sistema nervioso simpático, que moviliza las reservas energéticas. Al mismo tiempo, se inhibe la función del tracto gastrointestinal, debido en parte a la liberación aumentada de somatostatina. Ahora bien, puesto que la somatostatina no sólo inhibe la secreción y la motilidad del tracto gastrointestinal, sino también la liberación de hormonas que estimulan el metabolismo anabólico (almacenamiento de nutrientes energéticos), entra dentro de lo verosímil que el péptido sea responsable de la disminución del crecimiento, así como de las alteraciones de la función gastrointestinal. Una vez más se observa una clara correlación entre el crecimiento y el tracto gastrointestinal, expresada en este caso de forma negativa.

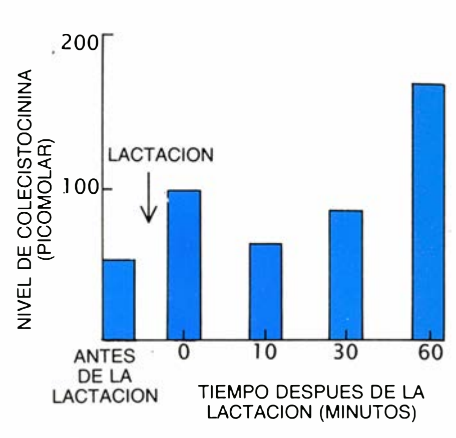
Desde un punto de vista fisiológico, la lactación es una continuación del embarazo: el sistema endrocrino y digestivo materno continúan nutriendo al recién nacido. La mayor diferencia estriba en que, ahora, la madre almacena la energía en un depósito especial, la glándula mamaria, y el recién nacido recibe la nutrición en forma de leche, cerrado ya el paso de nutrientes por el cordón umbilical.

La necesidad materna de calorías es incluso mayor durante la lactación que durante el embarazo. Se ha calculado que una madre lactante debe incrementar la ingesta de calorías en un 25 por ciento. ¿Cómo lo consigue? De nuevo, la forma más simple consiste en incrementar la ingesta por un aumento del apetito. Así ocurre, se ha observado en ratas, con el incremento de la ingesta desencadenado por la succión de leche por parte de las crías.

En previsión de una falta de alimentos durante la lactación, el organismo desarrolla, aparte del hambre, otros mecanismos fisiológicos para garantizar los requerimientos energéticos materno-filiales. Uno de ellos, la utilización, por parte de la madre, de las reservas almacenadas durante el embarazo, unos cuatro kilogramos de grasa. Esta tiende a almacenarse en muslos y nalgas; desde allí, y en condiciones normales, resulta difícil movilizar la energía. Per Björntorp, del Hospital de Sahlgrenska en Gothenburg, ha observado que tal movilización se ve facilitada en madres en períodos de lactancia, mediante un elegante mecanismo fisiológico: la actividad de la lipasa lipoproteica, enzima que promueve el almacenamiento de grasas, se halla reducida específicamente en muslos y en nalgas durante la lactación.

Pero no todas las mujeres gestantes almacenan grasas durante el embarazo. Debe haber, pues, otros mecanismos fisiológicos que ahorren energía en lugar de facilitar la degradación de las reservas existentes. Algunos investigadores acaban de descubrir una discrepancia entre el cálculo del incremento ideal de energía necesario para la lactación (un 25 por ciento en las mujeres) y el incremento real que tiene lugar en las ratas lactantes (que carecen de reservas grasas) o en las mujeres que no han almacenado grasas o que amamantan durante largos períodos de tiempo. De manera más específica, P. J. Illingworth y sus colaboradores, del hospital clínico y facultad de medicina de la Universidad escocesa de Ninewells en Dundee, han detectado que los músculos estriados en reposo (que normalmente producen calor después de una ingesta de alimentos) generan menos calor en madres lactantes que en mujeres no lactantes. Este ahorro energético puede explicar parcialmente de qué forma las mujeres lactantes reducen su gasto energético.

Aparte de los mecanismos de movilización y ahorro energético, un factor esencial en la producción de la energía requerida para la lactación y el embarazo es el aumento de actividad del sistema endocrino gastrointestinal. El incremento de actividad, que obedece, en parte, a una mayor ingesta, viene asimismo causado por el efecto de la succión del recién nacido sobre la madre. Angelica Lindén, Maud Eriksson, Kerstin Svennersten, Widström y la autora han observado en mujeres, y también en ratas, cerdos, perros y vacas, que, a cada período de succión, sigue una liberación de gastrina, insulina y colecistocinina, amén de caer el nivel de somatostatina. El cambio del patrón endocrino constituye una respuesta refleja a la succión, mediada por el nervio vago. El efecto desaparece en ratas lactantes cuando se secciona el nervio vago. (La verdad es que resulta muy probable que la actividad de todo el sistema nervioso parasimpático aumente en respuesta a la succión. Proceso que contrarrestaría la actividad del sistema nervioso simpático y, en consecuencia, explicaría la disminución de la producción de calor en los músculos, un mecanismo catabólico regulado por el sistema nervioso simpático.)



7. NIVELES DE COLECISTOCININA en un lactante, antes de la lactación, inmediatamente después y a los 10, 30 y 60 minutos. La elevación inicial es una respuesta a la succión; el nivel asciende de nuevo, cuando las células endocrinas detectan nutrientes.

Las consecuencias fisiológicas de la liberación de las hormonas gastrointestinales durante la succión son notables. En primer lugar, se optimiza el proceso digestivo y se produce un engrosamiento de la mucosa intestinal con la consiguiente adaptación a nuevos requerimientos metabólicos de la lactancia.

En segundo lugar, se favorece el almacenamiento de energía en detrimento de su consumo en procesos catabólicos. La energía se dirige a un órgano especial de almacenamiento, la glándula mamaria, mediante un incremento de la secreción de prolactina, hormona hipofisaria por cuya acción disminuye el número de receptores de insulina en el tejido adiposo materno (reduciendo, en consecuencia, el acúmulo de energía en este tejido) e incrementa el número de receptores en las glándulas mamarias, provocando allí la acumulación de nutrientes.

El efecto de la succión sobre la liberación de hormonas gastrointestinales contribuye a mantener un balance óptimo entre la ingesta y el gasto energético durante el período de lactación, ya que el estímulo de succión regula la cantidad de leche producida. Bo Algers, de la Universidad de Ciencias Veterinarias en Skara, y la autora han observado que la succión de los lechones eleva los niveles de prolactina materna

y disminuye los de somatostatina y que la magnitud del efecto depende de la cantidad total de estimulación del pezón (duración de la succión multiplicada por el número de lechones lactantes). Otro hecho que hemos observado junto con Widström demuestra una vez más la importancia del sistema endocrino gastrointestinal para el éxito de la lactancia: la magnitud del descenso de somatostatina en mujeres lactantes producida por la succión muestra una elevada correlación con la cantidad de leche suministrada al lactante.

Por último, la succión influye incluso en la conducta materna. Las madres notan somnolencia mientras amamantan. Las ratas muestran patrones electroencefalográficos característicos del sueño mientras alimentan a sus crías. Puesto que la colecistocinina es liberada por el tracto gastrointestinal en respuesta a la succión, el péptido se halla probablemente implicado, a través del vago, en estos efectos psicológicos. La sedación inducida por la succión podría servir, por una parte, para ahorrar energía y, por otra, para mantener a la madre junto a su cría.

Otro fenómeno de interés, radica en la respuesta endocrina gastrointestinal, mediada por el vago, que la succión desencadena en la madre y en el lactante, como el lector recordará. En efecto, la frecuencia e intensidad de la succión regulan la función gastrointestinal tanto en la madre como en el lactante, sincronizando así sus metabolismos. En otras palabras, se establece una relación simbiótica entre madre e hijo, no sólo psicológica sino también fisiológica.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

GASTROINTESTINAL HORMONES AND PATHOPHYSIOLOGY OF FUNCTIONAL GASTROINTESTINAL DISORDERS. Kerstin Uvnäs-Moberg en *Scandinavian Journal of Gastroenterology*, vol. 22, suplemento 128, págs. 138-146; 1987.

MATERNAL BEHAVIOR. Michael Numan en *The Physiology of Reproduction*, dirigido por E. Knobil *et al.* Raven Press, 1988.

NEUROENDOCRINE REGULATION OF HUNGER AND SATIETY. K. Uvnäs-Moberg en *Obesity in Europe*, vol. 1, dirigido por P. Björntorp y S. Rössner. John Libbey & Company, Ltd., en prensa.

ROLE FOR SENSORY STIMULATION IN ENERGY ECONOMY OF MOTHER AND INFANT WITH PARTICULAR REGARD TO THE GASTROINTESTINAL ENDOCRINE SYSTEM. K. Uvnäs-Moberg y J. Winberg en *Textbook of Gastroenterology and Nutrition in Infancy*, segunda edición, dirigido por E. Lebenthal. Raven Press, en prensa.

Colorística espacial

La superficie de la Tierra ofrece una irreproducible paleta a los observadores en órbita. La información justa de sus colores revela nuevas facetas de la naturaleza y de la visión humana

Vladimir V. Vasyutin y Artur A. Tishchenko

El cosmonauta que vuela por el espacio experimenta la impresión más vívida en la contemplación de los paisajes terrestres, brillantes y llenos de color, y en la observación de las salidas y puestas de sol. Son percepciones que ninguna técnica puede reproducir, ni siquiera simular. Las fotografías y otros medios artificiales son incapaces de transmitir la riqueza de los colores o ciertas configuraciones, muy complicadas, de la superficie que el ojo humano capta.

La descripción de esos colores de brillo y exuberancia insólita que las formaciones y fenómenos naturales presentan, ha constituido, durante muchos años, parte integrante del programa cosmonáutico soviético. Desde los primeros vuelos espaciales, hemos venido estudiando en qué difiere esa visión cromática de la habitual en el suelo. Nos hemos servido también de importante información sobre la Tierra que sólo el observador humano puede adquirir. Se da el nombre de colorística espacial a la investigación de la visión humana del color durante los vuelos espaciales, el desarrollo de instrumentos para medirla, la creación y refinamiento de telecolorímetros ópticos y automáticos, el estudio de las propiedades cromáticas de los objetos y fenómenos naturales y la investigación de los espectros de radiación y los errores en la percepción de las características espectrales.

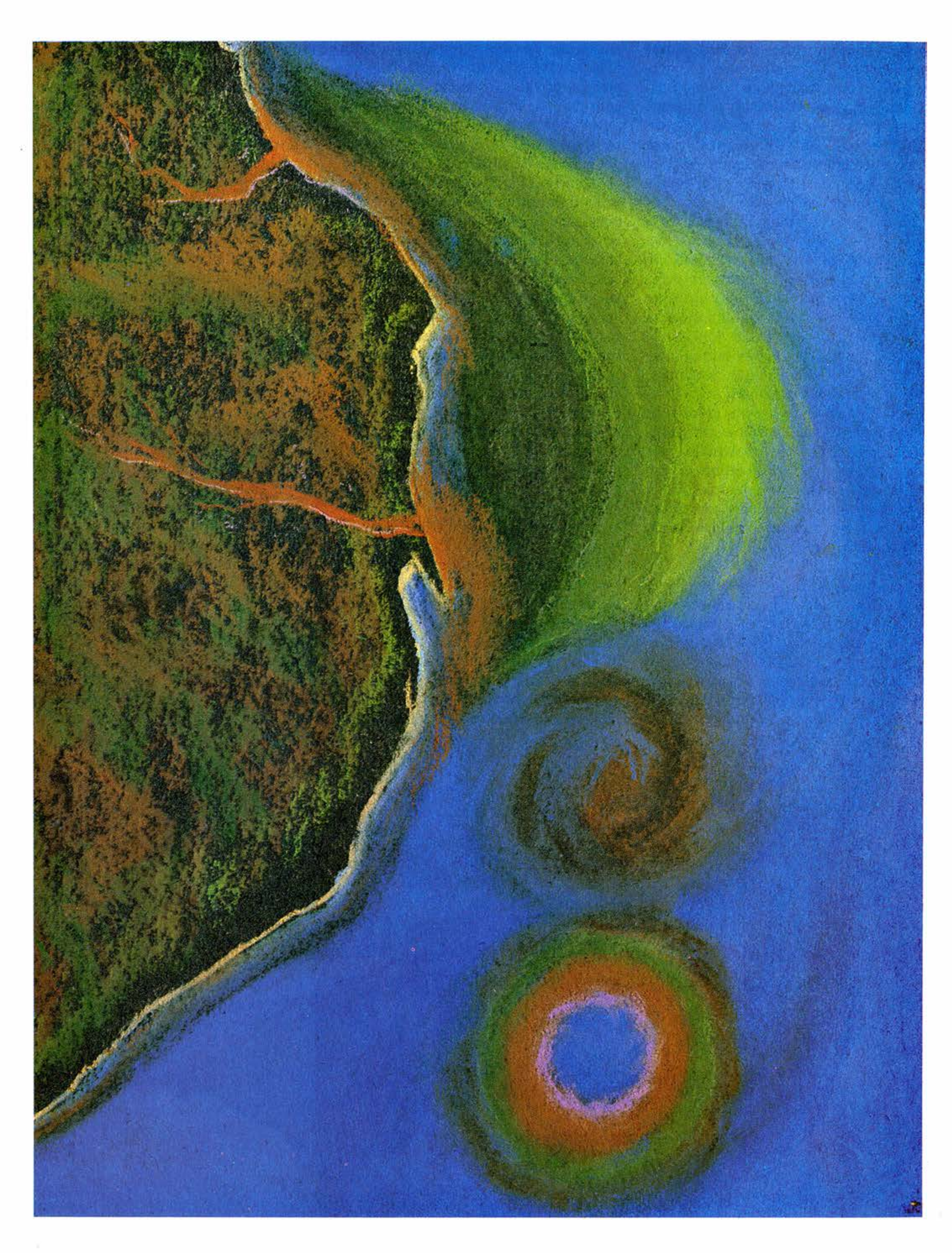
VLADIMIR V. VASYUTIN y ARTUR A. TISHCHENKO colaboran en el estudio de los colores vistos desde una nave en órbita. Vasyutin es piloto cosmonauta y trabaja en la Academia Gagarin de las Fuerzas Aéreas Soviéticas. Se graduó en la Escuela Militar Superior de Aviación, en Kharkov, en 1973, y se convirtió en cosmonauta en 1976. En 1986, pasó 65 días a bordo de la estación espacial *Salyut 7*, tiempo durante el cual llevó a cabo experimentos aquí detallados. Tishchenko dirige un laboratorio en el Centro Estatal Priroda (Naturaleza), en Moscú, y preside la sección de medio ambiente de la Federación de Cosmonáutica de la U.R.S.S. Ha intervenido en el desarrollo de colorímetros visuales, automáticos y de teledetección para uso en el espacio. Los experimentos colorísticos a bordo de las estaciones *Salyut 5*, *6* y *7* y de la estación orbital *Mir* fueron realizados bajo su supervisión.

Nuestro trabajo científico comenzó con el despegue de las estaciones orbitales tripuladas, al comienzo de los años setenta. Las estaciones posibilitaron las misiones de larga duración y permitieron una investigación minuciosa sobre la vision humana del color y la percepción de la información visual desde el espacio. Ya antes, los doctores especializados en aviación y medicina espacial habían obtenido datos sobre análisis visuales durante cortos vuelos espaciales. Los experimentos durante las misiones Voskhod y Soyuz (1965-1969) habían demostrado que, en las primeras 24 horas de vuelo, la agudeza óptica de los cosmonautas disminuía a medida que sus cuerpos se iban acostumbrando a la microgravedad; su visión del color experimentaba también interesantes cambios. Por dar un ejemplo, la percepción subjetiva del brillo cromático caía entre un 20 y un 25 por ciento, sobre todo en el extremo rojo del espectro.

Aun así, los ojos de los cosmonautas seguían siendo valiosos instrumentos para observar los accidentes de la Tierra que tenían a sus pies. El ojo y el cerebro del hombre poseen propiedades de las que carecen los sistemas mecánicos de teleobservación; la más sorprendente propiedad de ellos: su aptitud para detectar y reconocer configuraciones complicadas, aun cuando se presenten frente a un fondo confuso. Esta propiedad se llama constancia de la visión. Hay muchas clases de constancia; verbigracia, la de la profundidad relativa y la orientación de los objetos. La clave más importante es la de la percepción del color, que permanece a pesar de que cambie el espectro luminoso. Esta propiedad posibilita que los observadores superen la presencia de calima atmosférica, sombras amortiguadoras y manchas de luz del Sol, entre otros fenómenos atenuadores. Esta es la principal ventaja de los sistemas de teledetección basados en el ojo humano.

Hay numerosos factores que intervienen en la realización de buenas observaciones visuales desde el espacio; algunos de ellos son sutiles, como el propio tiempo que se emplea en cada observación. Desde su puesto en órbita, el ojo humano distingue fácilmente autopistas, buques, calles, bosques, calveros y otros accidentes de la superficie. Uno de los autores (Vasyutin) ha advertido, sin embargo, que la identificación de los pormenores o de objetos pequeños en un paisaje depende, en buena medida, de la duración de la observación. El ojo tarda algunos segundos en fijarse en pequeños detalles. Si el sujeto dirige su mirada a una región diferente, el ojo se desenfoca. A modo de referencia, se tarda entre tres y cinco segundos en distinguir un sistema de surcos de erosión en terreno cultivado. Los cosmonautas que invierten diferentes períodos de tiempo en enfocar el mismo accidente llegan a "ver" cosas distintas. Ello ha obligado a modificar los métodos para observar tales formaciones, al objeto de tomar ese efecto en consideración.

Con los años, han resultado igualmente necesarios otros cambios técnicos. Entre los problemas subyacentes a la observación visual en el espacio, uno es el relativo al adiestramiento de los cosmonautas para que superen sus estereotipos cromáticos: una indiferencia profundamente arraigada ante la información sobre los colores. Se impone también educarlos para que puedan separar sus sensaciones subjetivas en distintos componentes, digamos matiz,



1. PUNTA SUR DE MADAGASCAR, vista con la costa oriental en la parte superior. Muestra intensos contrastes de color en esta recreación de observaciones espaciales. El color verde brillante revela el plancton. Las corrientes predominantes en la región crean un vórtice que mezcla el agua de diferentes capas del océano; los niveles cambiantes de minerales en suspensión provocan el contraste de colores. El plancton crece en la frontera entre diferentes masas de agua.

color y brillo, incluso cuando se hallan sometidos a las condiciones del vuelo espacial, muy complejas. Anatoli N. Berezovoi, que realizó experimentos cromáticos a bordo de la estación orbital *Salyut 7*, en 1982, logró dominar ese arte. Pero no todos tienen ese don. Amén del adiestramiento, se exigen ciertas aptitudes naturales.

La persona cuyos ojos carezcan de la suficiente resolución espectral no puede identificar los objetos entre las cambiantes estructuras superficiales de la vegetación, agua, desiertos, etcétera. La gama de colores de la naturaleza se caracteriza por su variedad. La vista de un cosmonauta debe, por tanto, satisfacer los requisitos más exigentes. Mientras que un conductor sólo necesita distinguir entre los tres colores de los semáforos, un cosmonauta debe, como mínimo, estar capacitado para apreciar los principales matices dentro de un mismo color; por ejemplo, los diferentes tonos de castaño correspondientes a los diferentes colores de la arena de los desiertos.

Las condiciones de observación a bordo de un vehículo espacial son muy poco corrientes. La iluminación de un paisaje por el Sol y el centelleo de la atmósfera terrestre son complejos y extraños. Los pilotos avezados comentan el aspecto insólito de los paisajes y sus colores únicos cuando se embarcan en naves espaciales. Además, la velocidad del vehículo con respecto a la Tierra promueve el cambio constante de la fase de la iluminación de un objeto y el ángulo desde el cual se mira. No sólo se modifica el color del cielo según el tiempo atmosférico y el ángulo del Sol; los sutiles matices del cielo transmiten información sobre la pureza de la atmósfera y su contenido en vapor de agua. La observación se complica frecuentemente por la presencia de nubes de un brillo cegador y por el velo de la calima atmosférica. El cosmonauta ha de estar capacitado para distinguir entre esos parámetros y sus manifestaciones cromáticas.

Además de los requisitos de buena visión y adiestramiento, la observación de la Tierra desde el espacio depende también de diversos factores técnicos. El primero y obvio: la orientación del vehículo espacial durante el período de observación; el vehículo debe pasar por encima (o casi por encima) de la región a contemplar, con los ojos de buey en la posición adecuada. El cosmonauta dispone de muy poco tiempo para detenerse ante un punto del globo. En cuestión de 40 a 60 segundos, mientras el vehículo espacial se está acercando a la región señalada, el observador debe localizarla a través de hitos característicos, preparar el equipo registrador y apuntar al blanco, para anotar después el momento exacto de cada fotografía. Esta información resulta imprescindible para que luego, de acuerdo con los datos balísticos de la órbita del vehículo espacial, se pueda establecer el ángulo, altitud y distancia de observación, así como el ángulo bajo el cual el Sol iluminaba el objeto.

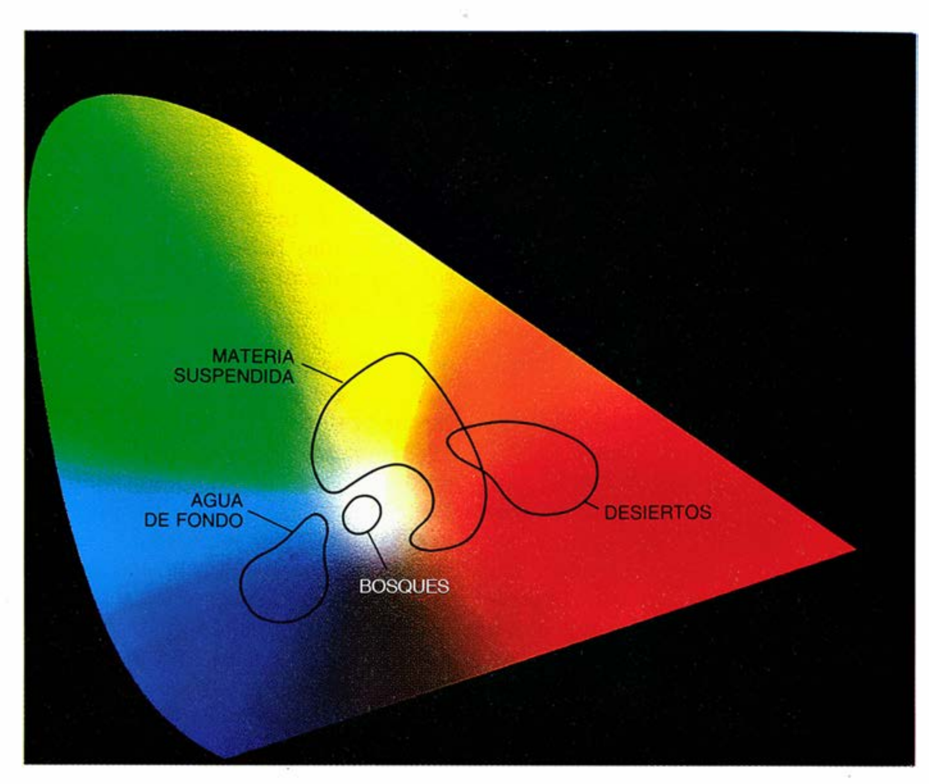
Los ojos de buey de la estación han de satisfacer también unas condiciones ópticas extremas. No deben distorsionar la imagen que se ve a su través, ni el espectro cromático de la luz incidente. Lo que reviste especial interés porque, a menudo, los cosmonautas han de observar objetos de bajo contraste. Los ojos de buey de las estaciones espaciales están hechos de un vidrio de cuarzo que absorbe muy poca luz visible y no deja pasar la ultravioleta de corta longitud de onda, que podría dañar los órganos de la visión. Los ojos de buey están protegidos por pantallas especiales que se abren solamente para las observaciones.

Una vez realizadas éstas, el cosmonauta las transmitirá de manera que permita a otros reconstruir lo que él vio y sacar las consecuencias pertinentes. A renglón seguido de la cámara, que transmite información directa sobre el color (aunque carece de la habilidad humana para el reconocimiento de la configuración y el color), el útil más importante lo encontramos en el atlas de los colores. Este libro reúne las muestras de referencia con las que se



2. ATLAS DE LOS COLORES Y COLORIMETRO, útiles que permiten determinar el matiz, la saturación y el brillo precisos de los accidentes naturales. El atlas ATS-1000, desarrollado en el Instituto Mendeleev de Investigación Metrológica, contiene 1000 muestras normalizadas, con diferencias de longitud de onda entre matices de unos cinco nanómetros. El atlas ha dejado paso al colorímetro Tsvet-1, que muestra los patrones de color y el objeto en la cámara.

cotejan los colores apreciados. Con la incorporación del atlas de los colores a bordo de los vehículos espaciales y estaciones orbitales, en las postrimerías de los años sesenta, los cosmonautas cambiaron sus descripciones, antes basadas en impresiones, asociaciones o contenido emocional, por un sistema de cifrado numérico, fundado en el matiz, la intensidad y el brillo, entre otras propiedades. El cifrado numérico acabó con la inseguridad que rodeaba las explicaciones de los objetos vistos desde el espacio. Eliminó también descripciones vulgares e imprecisas del tipo "Veo un lago del color de un samovar", o "Acabamos de pasar sobre el delta del río Sulak y el aluvión tiene color de ladrillo", o "Veo tierras de cultivo del color de un ratón". Con el atlas de los colores, basta con transmitir las cifras a la Tierra, donde las observaciones se pueden reconstruir usando un atlas parejo.



3. LAS FORMACIONES NATURALES caen en un dominio de colores bastante estrecho, según pone de manifiesto este diagrama cromático. Las regiones coloreadas se basan en observaciones realizadas en órbita. Aunque cada objeto de la Tierra posee su color característico, la clase del mismo se puede determinar rápidamente a partir del dominio de matiz, saturación y brillo en el cual cae. (Dibujo de George V. Kelvin.)

El primer atlas cromático, con 30 matices, fue empleado en 1968 por Georgi T. Beregovoi, a bordo del *Soyuz 3*, para medir los colores de las salidas de sol en el espacio. La intensidad y luminosidad de los colores del orto solar en el espacio eran tales, sin embargo, que aquel atlas de bolsillo resultó insuficiente para describirlas. En 1974, los cosmonautas del *Salyut 4* se sirvieron de un atlas de los colores del mar, desarrollado por oceanógrafos para reproducir la escala Forel, que se basa en un conjunto normalizado de 23 soluciones químicas, cuyos colores varían del azul al pardo. En 1977, los cosmonautas del *Salyut 6* disponían de un atlas de unos 300 matices.

La experiencia adquirida con el uso de estos atlas pioneros demostró que se necesitaba una gama cromática mucho más fina para describir los objetos con exactitud. No se podía encerrar la naturaleza en un número tan exiguo de muestras. En 1982, los cosmonautas a bordo de la estación orbital *Salyut 7* llevaron consigo el ATS-1000, un atlas dotado de certificado metrológico y desarrollado en 1970 por Ye. N. Yustova, del Instituto Mendeleev de Investigación Metrológica. Casi todos los resultados de este artículo se obtuvieron con la ayuda de ese libro.

El atlas de los colores ATS-1000 consta de 1000 muestras, cuyo matiz, intensidad y brillo se han medido con alta precisión. En términos de matiz, la exactitud de las muestras es de unos cinco nanómetros, lo que está próximo al valor umbral de discriminación cromática. Pese a sus limitaciones –voluminoso y de difícil manejo en un ojo de buey– y el subsiguiente desarrollo de una serie completa de telecolorímetros, el ATS-1000 sigue siendo un auxiliar inapreciable. Presta frecuentes servicios en casos inesperados; por ejemplo, resultó decisivo para el éxito del experimento del "electrotopógrafo", realizado, a bordo del *Salyut 7*, por Aleksandr P. Aleksandrov y Vladimir A. Lyakhov, en 1983. El experimento se había proyectado para medir variaciones en materiales de construcción expuestos a las condiciones del espacio; un revestimiento superficial especial hacía visibles los defectos de las muestras. Después de pasar el material por la escotilla estanca, los cosmonautas observaron que el revestimiento, en un comienzo grisáceo, había cambiado de color, sesgando potencialmente los resultados del experimento.

Los proyectistas del experimento y uno de nosotros (Tishchenko) ideamos una técnica para vigilar el color mediante el atlas ATS-1000 junto con medidas espectrales y de luminosidad de las muestras. Los cosmonautas pudieron así corregir la marcha del experimento y ampliar de manera apreciable la información obtenida.

Entre 1980 y 1983, los científicos del Instituto Estatal Priroda (Naturaleza), de Moscú, desarrollaron el Tsvet (Color)-1, colorímetro visual portátil, basado en una cámara réflex de lente única. El colorímetro contiene una "cassette" intercambiable con muestras visibles en el visor del aparato. El operador enfoca un objeto natural en el visor y manipula tres palancas para obtener una muestra de color pareja con el matiz, la intensidad y el brillo del campo observado. Fotografía entonces el objeto y anota las lecturas del color en la libreta de observaciones. Estos datos se transmiten a la Tierra en la sesión de comunicaciones inmediata. El Tsvet-1 fue usado en el espacio por Lyakhov y Aleksandrov, a bordo de la estación orbital *Salyut 7*, en 1983. El colorímetro visual alcanza una mayor exactitud de medida que el atlas. También éste resulta de difícil manejo junto a un ojo de buey, porque la luz que penetra incide sobre el atlas, lo que impide que el cosmonauta compare con precisión los matices. Con el Tsvet-1, las muestras de color se iluminan mediante una fuente de luz estable, independiente y calibrada.

El mismo período fue testigo también del desarrollo del colorímetro fotoeléctrico automático Tsvet-2. Se empleó éste en investigaciones llevadas a cabo en aviones cuyos vuelos se habían planeado para coincidir con observaciones desde la órbita. Quienes comenzaron a ensayar con el aparato lo usaron para estudiar el color del océano.

Se trataba, tal parecía, de la prueba más sencilla para los métodos colorimétricos por razón de la propia extensión oceánica, que cubre la mayor parte de la superficie terrestre y varía poco durante el curso de un vuelo. Después de llevar a cabo cierto número de experimentos a bordo de aviones, los investigadores quedaron un poco perplejos al comprobar que el océano presentaba una infinita variedad de colores: su superficie cambiaba según la hora, incluso en la misma zona.

Las primeras observaciones visuales e instrumentales de la Tierra fueron realizadas, a bordo del *Salyut 6*, por Georgi M. Grechko, Vladimir V. Kovalyonok y Valeri V. Ryumin, cosmonautas pioneros en largas estancias. Tales observaciones habían sido imposibles antes, porque se necesitan dos o tres semanas para que la visión de una persona se adapte a las condiciones en órbita y para que abra sus ojos a los menores detalles de los paisajes. Contemplaron enormes olas solitarias de 100 kilómetros de longitud, que constituían las trazas dejadas en la superficie del agua por tifones (lo que da una idea muy ajustada del tamaño de la borrasca) y por algunos de los accidentes característicos del fondo oceánico. El océano llama insistentemente la atención, con su constante mutabilidad y su cromatismo, rico y brillante.

En 1984, Leonid D. Kizim, Vladimir A. Solovyov y Oleg Yu. Atkov, que formaban la tercera tripulación del *Salyut 7*, investigaron los colores del océano Pacífico. En cuestión de dos semanas, tenían cartografiados sus colores. Hacerlo mediante buques de superficie hubiera costado de cinco a diez años. Además, las mediciones de superficie, que se basan en la escala de colores de Forel y en un disco blanco que se arría por la borda, habrían proporcionado sólo un número limitado de gradaciones de color.

Las primeras observaciones sistemáticas del océano desde el espacio fueron realizadas por Kovalyonok, en 1978, durante su segunda misión a bordo del *Salyut 6*. Invitó a los oceanógrafos a tomar parte en esas investigaciones, colaboración importante, habida cuenta de los beneficios económicos implicados en la navegación y las pesquerías. No tardaron en dejarse sentir los resultados de esta cooperación: los barcos pesqueros empezaron a confirmar altas concentraciones de peces en lugares indicados por los cosmonautas; otros buques recibieron recomendaciones desde el espacio sobre la mejor manera de evitar bancos de hielo o zonas de mar muy gruesa. (Desde la década de los cuarenta, las flotas pesqueras empleaban aviones de reconocimiento que transportaban "ojeadores" expertos, prácticos con habilidad para determinar, a partir del color y forma de un banco, la clase de peces que aloja.)

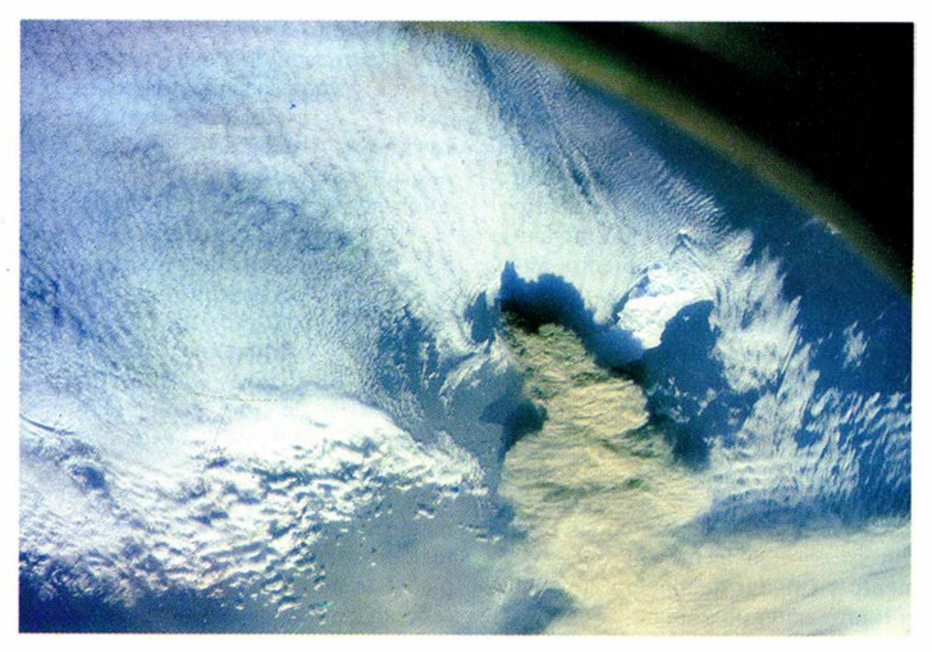
Las observaciones orbitales de Kovalyonok y las evaluaciones ante un atlas, tras el vuelo, del color del agua echaron los cimientos para comenzar a abordar auténticos experimentos cromáticos en el espacio. Berezovoi y Valentin V. Lebedev realizaron sus ensayos en el *Salyut 7*, en 1982. Eran cosmonautas especialmente adiestrados en la teoría y práctica de la ciencia de los colores. Se prepararon en ejercicios con un avión-laboratorio realizando vuelos sobre el mar Negro, mar Caspio, mar de Okhotsk y mar del Japón.

Un mes después del lanzamiento, Berezovoi dibujó en su diario los primeros bocetos de la textura de la superficie del océano. Durante sus 211 días en órbita, recogió más de veinte estructuras de la superficie oceánica, características de las corrientes verticales y horizontales, diversas configuraciones de la circulación del agua y formaciones asociadas a concentraciones de suspensiones orgánicas e inorgánicas en las profundidades marinas. Los mares picados y las corrientes debidas al viento se superponían a esas estructuras, muchas de las cuales nunca se habían observado con anterioridad.

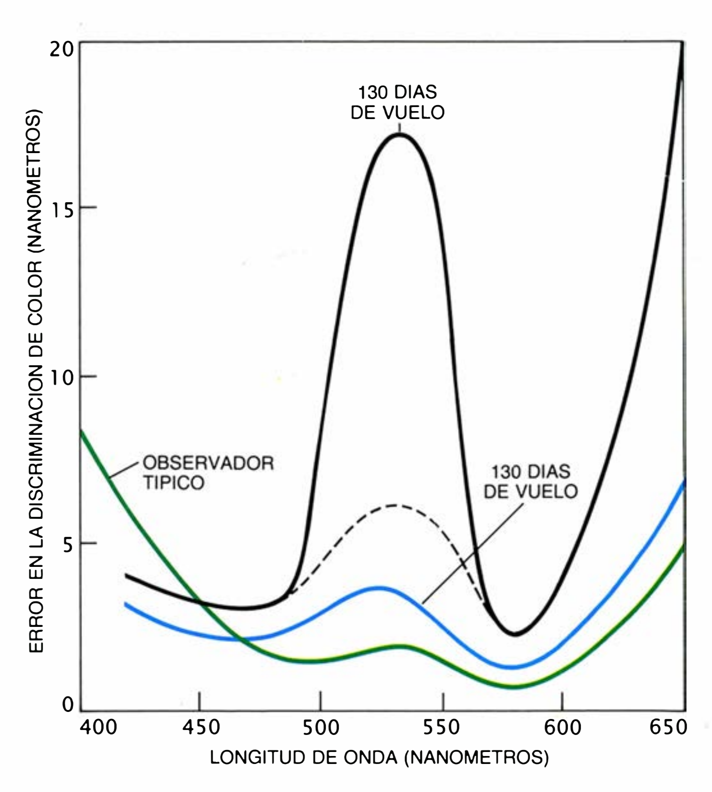
En el curso de esta misión, los cosmonautas tomaron unas 150 medidas cromáticas del océano. Registraron formaciones en superficie cuyo tamaño variaba de 10 a 500 kilómetros. Identificaron así tres zonas importantes que emergían de un fondo azul oscuro: aguas "desérticas" de color azul claro, aguas verdes ricas en plancton y aguas pardas ricas en minerales en suspensión y plancton envejecido. El contraste de colores entre los objetos observados y las aguas de fondo se cifraba, en promedio, en unos 10 nanómetros.

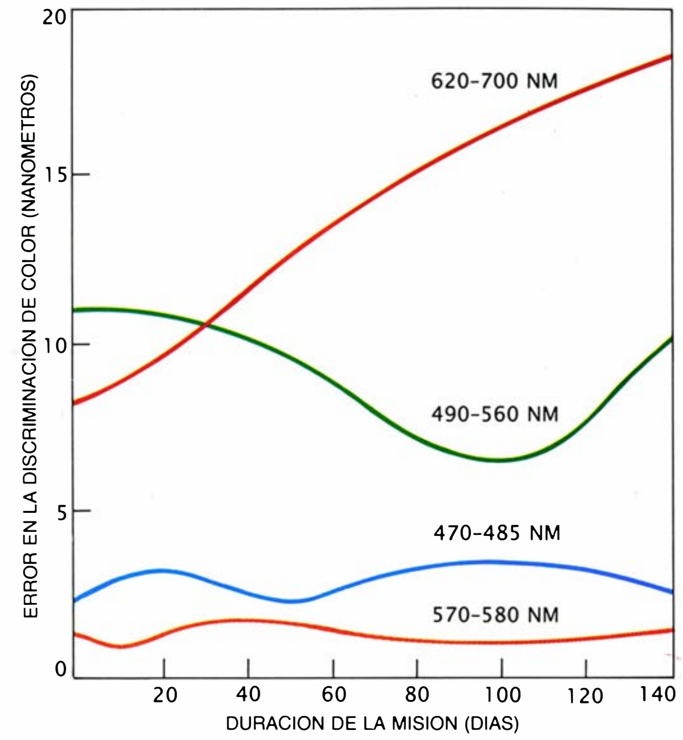
Las observaciones del océano que limita la costa de Argentina constituyen un ejemplo típico de los experimentos colorimétricos de Berezovoi. Investigó también el contraste cromático de las corrientes oceánicas, que tienen temperaturas y concentraciones salinas diferentes de las que alcanzan las aguas circundantes. Las estructuras de las corrientes y su evolución a lo largo del tiempo son temas importantes de estudio para los oceanógrafos. Las corrientes oceánicas influyen significativamente sobre el balance de temperatura entre la atmósfera y el océano y determinan el tiempo meteorológico, en la proximidad de las propias corrientes y lejos de ellas.

Además de examinar las características de la superficie oceánica, los investigadores juzgaron también el tiempo necesario para observar tales peculiaridades desde la órbita. Registraron el tiempo exigido para la detección de un objeto de interés en el movimiento



4. ERUPCION DEL VOLCAN ALAID en la isla Atlasova, en el archipiélago de las Kuriles, fotografiada desde la órbita. Nos ofrece el detalle observable desde el espacio. El casi imperceptible matiz rojizo del humo, cuyo color preciso fue registrado por los cosmonautas Vladimir V. Kovalyonok y Viktor P. Savinykh, proporcionó a los vulcanólogos información valiosa sobre la composición química y consistencia de la erupción.





5. LA VISION DEL COLOR DE LOS COSMONAUTAS difiere apreciablemente de la manifestada por un observador terrestre. Los errores en la determinación del color de un objeto varían con la longitud de onda (*izquierda*) y con el tiempo pasado en órbita (*derecha*). Los cosmonautas muestran menores errores de discriminación en el extremo azul del espectro y errores mayores en el extremo rojo que los individuos que habitan en tierra. Su discriminación de colores en las regiones azul-verde y amarillo-anaranjada permanece sin cambios. El error de discriminación en el verde experimenta una variación cíclica.

de aproximación hacia el mismo: cuándo aparecían los atributos del color mientras el vehículo alcanzaba la posición sobre la zona; e hicieron lo propio con el tiempo durante el cual se podían registrar los colores del objeto y del fondo mientras se volaba sobre ellos.

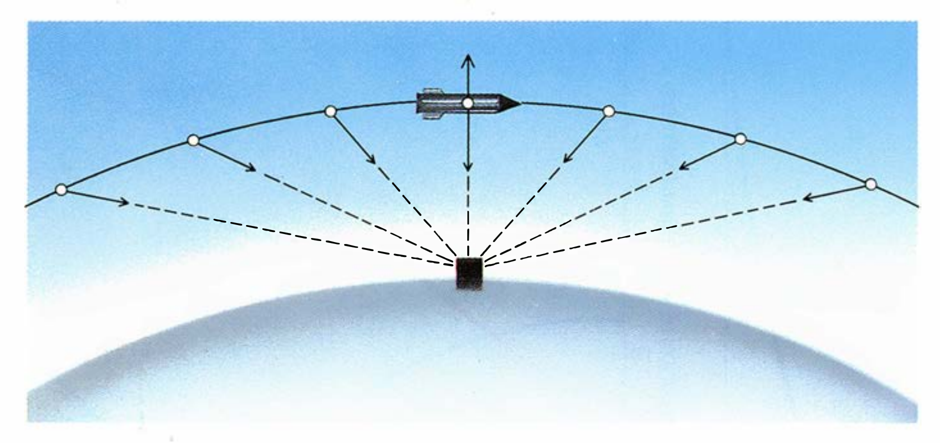
Los resultados fueron, en buena medida, inesperados. Cuando el contraste de color era alto, esto es, cuando el Sol estaba entre 30 y 45 grados sobre el horizonte y a un lado o detrás del observador, podíase contemplar un objeto sobre la superficie oceánica durante tres o cuatro minutos. Los cosmonautas podrían observar los objetos de alto contraste en tierra (por ejemplo, oasis del desierto) durante seis minutos, casi de horizonte a horizonte. Los registros fotográficos y en vídeo, por otra parte, sólo se muestran eficaces dentro de unos 45 grados del nadir y durante un tiempo de observación de 1,5 a 2 minutos. La capacidad de los ojos para superar los efectos de la atenuación atmosférica y su habilidad para discernir rasgos durante largo tiempo son las principales ventajas de la observación humana.

Pero los expertos no se han limitado a recoger datos sobre los rasgos característicos de la Tierra y los océanos. Han abordado el comportamiento de la visión humana del color durante largos vuelos espaciales. Trabajo que vino exactitud de las medidas visuales del color. Cada cosmonauta realizó cierto número de pruebas en las que emparejó muestras de una tabla especial de 30 pigmentos (10 matices con tres gradaciones de intensidad y brillo para cada uno) con los colores patrón de un atlas de los colores o de un colorímetro visual. La diferencia entre el matiz percibido y el verdadero determinaba el error absoluto de las mediciones cromáticas de los cosmonautas. Estas pruebas se repitieron una y otra vez, durante largos vuelos, con el propósito de acumular datos suficientes para extraer las pautas regulares de variación.

De las pruebas emergieron varias pautas. La discriminación de color en el extremo azul del espectro era estable, signo de la eficacia de la observación visual del océano. La visión del color en la región verde-azulada (alrededor de 490 nanómetros) y en la región anaranjada-amarilla (unos 580 nanómetros) era también bastante estable; se mostraba alta la sensibilidad de los cosmonautas ante las diferencias cromáticas. Los errores de discriminación de color pasaban por un mínimo. Por afortunada coincidencia, los verdes, azules, anaranjados y amarillos son los colores que revisten mayor interés para los biólogos: se trata de los instado ante la necesidad de juzgar la que presentan, por lo común, océanos, bosques y desiertos.

No anduvieron muy finos los cosmonautas a la hora de emparejar las muestras de color en el extremo rojo del espectro. El error en la discriminación del rojo, alto ya en tierra, se dispara en el espacio. Pese a lo cual, los cosmonautas lograron identificar los colores de grandes regiones de pardos de baja intensidad (como se vería en algunos desiertos y zonas rocosas) con bastante exactitud.

Los experimentos espaciales mostraron una tendencia cíclica de error en la valoración del verde: los errores de color aumentaban en los primeros cuatro meses de vuelo y después disminuían. El verde es un color crítico para juzgar la calidad global de la visión de un cosmonauta, porque aparece con frecuencia en los paisajes naturales y porque las plantas encierran un obvio interés biológico y económico. Paradójicamente, varios cosmonautas han confesado, después de sus misiones, no haber visto zona verde alguna. Resulta muy difícil discernir la presencia de un bosque porque la intensidad de sus colores verdes cae en el umbral de discriminación del ojo. Durante un experimento colorístico, Vasyutin estaba observando un área boscosa frente al fondo del desierto en la costa medite-



6. COMIENZA EL CICLO DE OBSERVACION cuando un objeto aparece sobre el horizonte correspondiente a la estación orbital. Según sea la forma y contraste del objeto, puede tardar segundos o minutos en hacerse visible. Cuando el vehículo espacial pasa por encima, la visión mejora y se pueden discernir los colores del objeto. El proceso se repite a la inversa si el vehículo espacial se aleja: el color comienza indiscernible; luego, el propio objeto se pierde confundido con el fondo de la tierra o del océano. El período exacto de tiempo disponible para la observación depende del contraste de color entre el objeto y el fondo del que destaca, así como de la manera en que el objeto refleja la luz. Los objetos del suelo reflejan la luz de forma difusa y las configuraciones del océano producen reflexiones cuasiespeculares. (Dibujo de George V. Kelvin.)

rránea de Libia. Las coordenadas de color que registró no correspondían a un verde, sino a un color lila grisáceo. La subsiguiente y cuidadosa observación del bosque mostró que tenía un color terroso, aunque de intensidad muy baja. En esa época, los cosmonautas llevaban en órbita aproximadamente un mes.

Las pruebas normalizadas de discriminación de colores muestran sólo una parte de la historia. En realidad, los cosmonautas deben observar objetos naturales bajo muchas intensidades y espectros de iluminación diferentes. Los espectros de la luz reflejada para distintos ángulos del Sol y para distintas condiciones atmosféricas no se han estudiado suficientemente. En muchos casos, sin embargo, los cosmonautas logran discriminaciones cromáticas de los objetos naturales más finas de lo que los colores de esos objetos y las pruebas sugerirían. Esta superior aptitud para discriminar los colores de los objetos reales en la Tierra no es propiedad exclusiva de la visión de los cosmonautas; débese también al realce del contraste cromático de los objetos vistos desde el espacio. Todos los cosmonautas han comentado el brillo e intensidad de los colores que vieron desde el espacio. Las razones de ese fenómeno han de aclararse todavía, aunque pueden guardar alguna semejanza con el efecto de realce de colores que los artistas logran cubriendo la superficie de un cuadro de un barniz reflector.

Acerca de este punto se obtuvieron algunos datos interesantes en la parte septentrional del mar Caspio, durante la primavera de 1982, en un experimento realizado simultáneamente a bordo del *Salyut 7* y un avión-laboratorio AH-30. Lebedev y Berezovoi, tripulantes de la nave espacial, debían observar la eclosión primaveral del plancton en la bahía de Kizlyar y alrededor de la península de Agrakhansky. A mediados de mayo, los dos informaron de extensas bandas verdes cerca de la península de Agrakhansky, paralelas a la costa. El 20 de mayo, una expedición aerotransportada despegó hacia Astrakhan, para hacer observaciones "bajo el satélite". Uno de nosotros (Tishchenko) acometió un estudio detallado de la región y midió sus colores. Visto desde el avión, el plancton crecía en una única banda de 400 metros de anchura, formada por muchos escalones cuyos colores se amortiguaban desde la costa y se encontraban a distancias regulares de ésta.

Al volver a Moscú, el 30 de mayo, Tishchenko pidió a Lebedev y Berezovoi que especificaran, "en caliente", los colores de las brillantes tiras verdes. Para sorpresa de todos, aquéllos advirtieron colores de cinco tiras, no de una. El brillo y contraste de las tiras vistas desde el espacio eran mucho más intensos. Ese cromatismo realzado se aprecia también algunas veces desde un avión, volando sobre el agua a unos 10 kilómetros de altura, si se dan ciertas condiciones meteorológicas. En casi todas las misiones siguientes, se ha venido solicitando a los cosmonautas que se fijen en determinadas formaciones naturales cuyos colores se suponen estables. Las mismas formaciones se han estudiado regularmente desde aviones de reconocimiento.

Las investigaciones colorísticas llevadas a cabo hasta ahora han proporcionado las bases para desarrollar nuevas técnicas de obtención de información espectral sobre nuestro planeta. Mientras que las técnicas apoyadas en satélites de teledetección, pensemos en el *Landsat*, miden, en cierto número de bandas espectrales, el brillo del suelo que tienen a sus pies y presentan luego esa información cifrada, las técnicas cromáticas basadas en la observación humana determinan los colores característicos de importantes rasgos naturales y ofrecen esos colores directamente. Recurren también a la capacidad humana para percibir configuraciones que no se pueden detectar por medios fotográficos o de otra índole artificial. Dadas sus ventajas, estas técnicas de exploración remota parecen muy prometedoras, en el campo de la ciencia y de la economía.

Las investigaciones referentes a la calidad de la visión en color en el espacio han ayudado a mejorar la eficacia de las prestaciones de los cosmonautas en tareas no relacionadas con el estudio de la Tierra. Además, la colorística espacial ha permitido formular nuevos patrones visuales para el estudio de la naturaleza desde el espacio, diferentes según la clase de objeto a observar. Las primeras mediciones visuales de los parámetros cromáticos de objetos naturales poco conocidos abrieron el camino para establecer mejores especificaciones de los espectrómetros de exploración remota y sistemas fotográficos. Las insólitas condiciones de la vida en el espacio y los nuevos factores –los cambios en la visión, entre ellos– que afectan a la vida y el trabajo, y que se han identificado en órbita, pueden contribuir al desenvolvimiento de potencialidades humanas hasta ahora apagadas.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

COLOR INVESTIGATIONS OF THE EARTH. A. A. Tishchenko en *Aviatsiya i kosmonavtika (Aviación y Cosmonáutica)*, n.º 5, pág. 46; 1983.

TSVET-I COLORIMETER. A. A. Tishchenko en *Aviatsiya i kosmonavtika*, n.º 1, pág. 44; 1984.

CHANGES IN COLOR VISION PARAMETERS IN LONG-TERM SPACE FLIGHT. V. V. Vasyutin, A. A. Volkov, A. A. Tishchenko y V. Ye. Fokin. (Collection of Scientific Readings on Cosmonautics, in Memory of Gagarin.) Nauka, Moscú, 1986.

SPACE COLORISTICS. A. A. Tishchenko en *Tekhnicheskaya estetika (Ingeniería Humana)*, n.º 5, págs. 3-5; 1987.

El pensamiento visual en la edad de Hielo

Después de 2.500.000 años en que los registros arqueológicos revelan pocas innovaciones, los adornos corporales y las imágenes visuales irrumpen en escena en la Europa de hace unos 35.000 años

Randall White

Durante los primeros 2.500.000 años de los registros arqueológicos, los únicos utensilios de los seres humanos y de sus precursores homínidos son estrictamente utilitarios: herramientas de piedra. Más tarde, hace unos 35.000 años, Europa da un giro brusco y repentino. Al lado de nuevas clases de instrumentos de piedra y de utensilios tallados en hueso y asta, aparecen los primeros objetos de naturaleza simbólica. Comprenden éstos tanto los primeros adornos del cuerpo, en forma de cuentas y pendientes, como los primeros ensayos de que hay noticia para representar la naturaleza, lo mismo en dos que en tres dimensiones.

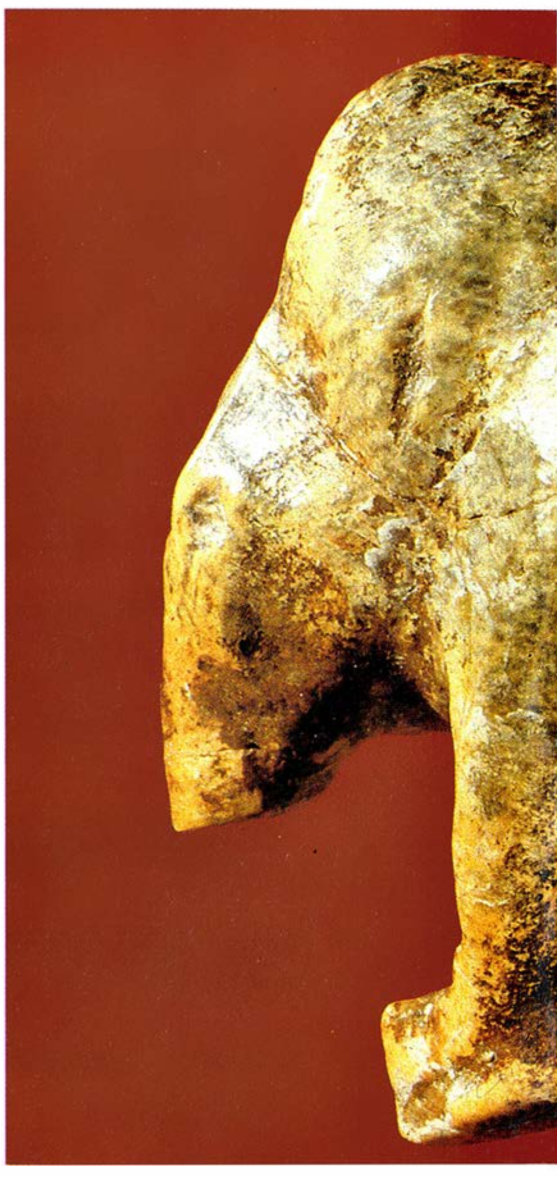
Esta eclosión cultural, que señala el comienzo del período conocido como Auriñaciense, tuvo lugar simultáneamente en vastas extensiones de Europa occidental y oriental. ¿Por qué?

Se ha supuesto durante mucho tiempo que la respuesta pertenece al campo de la biología: los seres humanos modernos desde el punto de vista anatómico *(Homo sapiens sapiens)* evolucionaron y reemplazaron a los precedentes neanderthales, poniendo en juego nuevas y significativas aptitudes neurológicas. Sin embargo, las investigaciones más recientes consideran muy improbable esa explicación. Se cree que el *Homo sapiens sapiens* evolucionó en Africa hace 100.000 años (o más) y se trasladó a Europa varios miles de años antes del comienzo del Auriñaciense. Durante la mayor parte de ese período, nuestra subespecie no desarrolló nada que pudiera llamarse simbólico. De ahí que la aparición de ornamentos y representaciones se atribuya a procesos culturales, y no biológicos o neurológicos. El estudio de las primeras imágenes materiales brinda oportunidades prometedoras para internarse en este hito de la evolución cultural.

RANDALL WHITE es, desde 1981, profesor de antropología de la Universidad de Nueva York. Canadiense de nacimiento, se doctoró en filosofía en la Universidad de Toronto. Parte del trabajo descrito en este artículo surgió al percatarse de que los museos norteamericanos tenían enormes colecciones de arte y utensilios de la edad de Hielo en Francia, la mayoría de los cuales no habían sido nunca estudiados ni descritos en publicaciones científicas y se daban por perdidos por los prehistoriadores franceses. Lleva investigados más de 2000 adornos y cuentas incompletas de esa franja temporal.

Es creencia generalizada que el inicio del período Auriñaciense en Europa coincide con la transición, más dilatada, de la cultura del Paleolítico Medio a la del Paleolítico Superior. Mientras se asignaba a los primeros seres humanos de anatomía moderna una antigüedad de unos 35.000 años, esta transición podía explicarse por la aparición del *Homo sapiens sapiens*. Sin embargo, en los últimos años se han encontrado en el Cercano Oriente y en Africa del sur restos óseos de *Homo sapiens sapiens* de unos 90.000 años de antigüedad. Estudios de ADN mitocondrial localizan en Africa el origen de todas las poblaciones humanas actuales, quizás en fecha reciente, entre 50.000 y 250.000 años atrás. Esta hipótesis implica que todas las razas humanas actuales descienden de grupos que emigraron de Africa en un período posterior.

La expansión parece que se consumó en Europa occidental hace unos 30.000 años, cuando los más robustos y poderosos neanderthales fueron reemplazados por los tipos modernos, más gráciles o esbeltos. Se cree que esta substitución se produjo con bastante rapidez, dentro de un lapso de tiempo brevísimo, unos 5000 años. Una vez terminada, la costumbre de adornar el cuerpo (característica ahora de todas las sociedades humanas) se había generalizado en Europa y tierras tan alejadas como Australia. El autor y otros arqueólogos están estudiando detalladamente el conjunto de testimonios



1. MAMUT LANUDO, esculpido en marfil de mamut, recuperado en el yacimiento de Vogelherd,

más nutrido, procedente de yacimientos auriñacienses de Francia, Bélgica y Alemania. En este artículo se describirán los adornos del cuerpo más antiguos y los intentos empeñados en interpretar su relación con otros avances realizados durante la transición al Paleolítico Superior, incluida la aparición de las primeras representaciones de la naturaleza.

La mayor abundancia de los primeros adornos corporales está asociada a las primeras fases del Auriñaciense, que se sitúan aproximadamente desde hace 34.000 hasta hace 30.000 años. Los mismos niveles culturales en que aparecen estos adornos revelan también industrias muy desarrolladas de piedra, hueso y astas. Los útiles de piedra incluyen diminutas cuchillas de pedernal, así como instrumentos para raspar y grabar, hechos transformando hojas de sílex de alta calidad. Las piezas en hueso y asta comprenden leznas, cuñas, puntas de lanza y raederas. Esta colección de útiles contribuía a la subsistencia de grupos humanos pequeños, que cazaban renos, mamuts lanudos, caballos salvajes, bisontes y ciervos comunes de Europa. Del mismo período datan las primeras pruebas importantes que se han encontrado de pesca fluvial y de caza de aves.

En los centenares de yacimientos que se sabe haber sido ocupados por cazadores auriñacienses, los arqueólogos encuentran a menudo objetos que interpretan como cuentas o colgantes. Tales objetos están hechos de materiales muy diversos, incluidas piedras blandas, conchas, dientes y, más frecuentemente, marfil de los colmillos de mamuts lanudos. Muchos de ellos se habían perforado para colgarlos, y se sabe, por el período cultural siguiente (llamado Gravetiense), que estas cuentas y colgantes estaban destinados al adorno del cuerpo. En la estación de Sungir, cerca de Moscú, fechada entre 28.000 y 24.000 años, se encontraron miles de cuentas de marfil, cuidadosamente trabajadas, y dientes perforados, reunidos en largas sartas, que cubrían los restos de varios individuos.

Antes incluso, a finales del Auriñaciense, los enterramientos estaban acompañados de adornos. Uno de los yacimientos auriñacienses más estudiados que cuenta con adornos corporales es la estación clásica de Cro-Magnon, en el valle del Vézere, del suroeste de Francia. En 1868 los obreros del ferrocarril descubrieron allí cuatro esqueletos de adultos y uno de un feto, amén de numerosas conchas perforadas y un colgante de marfil. El conjunto data de hace unos 28.000 años, a finales del Auriñaciense.

Sin embargo, los primeros adornos corporales, de comienzos del Auriñaciense, no se han encontrado aso-



Alemania. Se le ha datado entre 34.000 y 30.000 años atrás, durante el período cultural Auriñaciense. En ese mismo lapso temporal aparecen los ornamentos corporales y las imágenes bidimensionales por primera vez en los registros arqueológicos. Se desconoce cuál sea el significado de las X grabadas.

ciados a enterramientos. Por el contrario, las cuentas y los colgantes aparecen a centenares en los lugares de acampada y de habitación ocupados por los primeros representantes del *Homo sapiens sapiens* en Europa. Robert H. Gargett, de la Universidad de California en Berkeley, acaba de cuestionar que los neanderthales enterraran sus muertos. Si Gargett está en lo cierto, los primeros enterramientos podrían situarse bastante después de la aparición en Europa del *Homo sapiens sapiens*. Tenga o no razón, los adornos más primitivos hay que considerarlos excluidos del ámbito de los enterramientos. Esto limita el alcance a que se puede llevar el proceso de interpretación, porque sin enterramientos es difícil decir gran cosa sobre las diferencias en el adorno corporal que pudieran estar asociadas a la edad y el sexo, entre otras variables sociales.

Sin embargo, antes de pasar a la interpretación, me gustaría comentar la localización de los adornos corporales –en términos de su distribución en yacimientos auriñacienses– y el proceso de elaboración. Aunque los objetos de adorno abundan bastante en todas partes, su frecuencia varía de un yacimiento a otro. Algunas estaciones tienen pocos o ningún adorno, a pesar de ofrecer excelentes condiciones para su conservación; otras, en cambio, han proporcionado centenares de ellos. Muchas de las estaciones en que los adornos abundan no sólo proporcionan objetos acabados, sino también material de desecho y labores terminadas sólo en parte. Este espectro de los materiales de producción señala que los adornos se hacían en aquel lugar y permite a los arqueólogos, como veremos, reconstruir la secuencia del proceso de producción.

Uno de los aspectos más sorprendentes de los adornos auriñacienses es que se utilizaban para su manufactura materiales exóticos, ajenos a los yacimientos donde aparecen. Durante el Auriñaciense se aprecia que ha aumentado considerablemente la capacidad de los grupos humanos para conseguir materiales de zonas distantes. Ciertos tipos de piedra blanda, concha y marfil se encuentran en estaciones situadas a cientos de kilómetros de donde la naturaleza los ofrecía. No se sabe si estos materiales tan raros y excepcionales se lograban mediante el desplazamiento o el desarrollo de una red de intercambio entre diferentes grupos; pero llama la atención que, en la mayoría de los casos, estas sustancias exóticas se transformasen en adornos y no en utensilios o en armas.

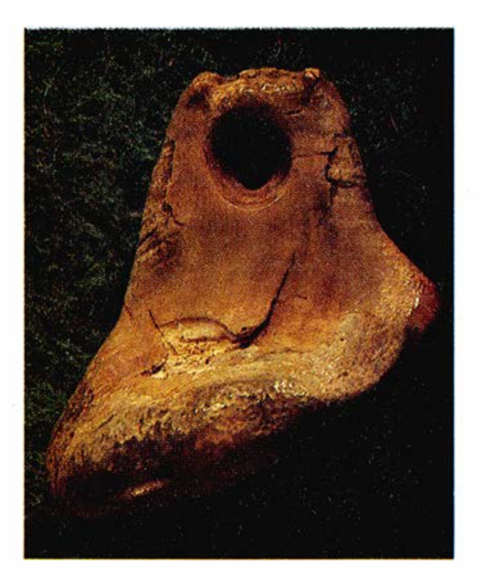
Este comportamiento indica seguramente que los Auriñacienses daban gran valor a los materiales "extranjeros" y que éstos se explotaban con fines de alarde social. Más aún, la mayoría de los materiales exóticos se encuentra en estaciones ricas en adornos. No se



2. PRODUCCION DE CUENTAS en el suroeste de Francia durante el período Auriñaciense, según reconstrucción del autor del artículo. El punto de partida era una varilla de marfil de mamut (*1*), en la que se hacía incisiones circulares para formar puntos de ruptura. Una vez fragmentada, cada varilla proporcionaba una serie de "tacos" precursores de las cuentas (*2*). Entonces, los tacos se tallaban de forma que, por un extremo, presentasen un "bulbo" grueso y, por el otro, un "tronco" fino (*3,4*). El taco se perforaba (*5*) y después se raspaba y alisaba hasta convertirlo, por último, en una cuenta perfectamente pulida (*6*).

comprende aún por qué algunos yacimientos son tan ricos en ornamentos y materiales exóticos, pero es posible que las estaciones ricas fueran sitios prefijados donde se producía el trueque de materiales de valor, atrayendo quizás a gentes de muy lejos. Hay otras explicaciones posibles, pero parece probable que los yacimientos ricos en adornos representen contextos especiales en los que el boato social fuese de la mayor importancia.

Como quiera que se produjese la concentración de materiales exóticos en determinadas estaciones, su transformación en adornos parece haber estado condicionada por un complejo marco conceptual. Los fabricantes de adornos no elegían al azar su materia prima. Al contrario, practicaban una selección consciente de la gama de materiales disponibles. Por ejemplo, una amplia clase de adornos consta de dientes perforados de animales, pero cuando esos dientes se convertían en colgantes, se escogían sólo los de ciertas especies, generalmente de carnívoros. Hay excepciones: la estación de Mladeč, en Checoslovaquia, ha proporcionado abundantes dientes de castor perforados. Sin embargo, en la mayoría de los yacimientos auriñacienses las especies preferidas eran cazadoras: zorro, lobo, hiena y oso.





3. REMEDO DE LA NATURALEZA: una de las notas peculiares del adorno corporal auriñaciense. La cuenta de la izquierda es un diente canino, perforado, de un reno. La de la derecha imita aquélla en piedra caliza. Las dos proceden de la estación de Trou Magrite, en Bélgica, y tienen unos 30.000 años de antigüedad.

Parece muy verosímil que los fabricantes de adornos del Auriñaciense, al elegir los dientes de ciertas especies, intentaran evocar o asimilar las cualidades propias de las mismas. El proceso intelectual por el que una parte representa el todo se llama metonimia y es bien conocido tanto en la literatura como en la mitología. Homero, por ejemplo, se refiere a veces a los barcos llamándoles "velas". Mas, en nuestro terreno, un fundamento metonímico de los adornos corporales es conocido de los antropólogos que estudian sociedades rudimentarias, cuyos miembros tienen medios materiales y rituales para las cualidades de animales. El hecho de que se prefiriesen los carnívoros está perfectamente de acuerdo con esta explicación; según muestran los restos de sus comidas (desperdicios), los grupos auriñacienses se nutrían preferentemente por medio de la caza.

Si la base conceptual de los adornos auriñacienses parece relativamente compleja, la tecnología empleada para poner en práctica estos conceptos varía desde la muy elaborada hasta la sencilla en extremo. Este cabo de la secuencia está representado por conchas marinas perforadas y dientes de animales. Las conchas y las raíces de los dientes de animales rara vez superan los dos centímetros de grosor. Los auriñacienses perforaban las piezas excavando por ambos lados hasta que podían traspasarlos con la simple presión de un objeto puntiagudo. La perforación directa no se usaba casi nunca, excepto con las sustancias más blandas. A decir verdad, los conjuntos de utensilios de comienzos del Auriñaciense se caracterizan por la ausencia de buriles finos de pedernal que solemos encontrar en estaciones más recientes. Otro sistema consistía en grabar un surco alrededor de la raíz, que servía tal vez para atar un cordón.

Las conchas, junto con ciertos tipos de dientes y de huesos, vienen en paquetes "dispuestos para perforar". El marfil de mamut, en cambio, requería métodos de preparación más complejos. Cuando los grupos auriñacienses conseguían trozos de marfil de mamut, lo reducían a unidades de tamaño apropiado para su propia forma de producción. El criterio de aceptación variaba considerablemente según las regiones y dependía, en última instancia, de diferencias regionales de estética y simbolismo. La descripción siguiente se concentra en el suroeste de Francia, por ser ésta la región que ha proporcionado el mayor muestrario de adornos corporales y, también, porque es donde se ha concentrado la mayor parte de mi trabajo.

La producción de cuentas de marfil en el suroeste de Francia partía de largos "bastones" de marfil de mamut. Estos venían al parecer de bastante lejos, puesto que hay pocos fragmentos de colmillos desechados y ningún hueso de mamut en los yacimientos franceses. Los bastones de marfil se habían extraído, en sentido longitudinal, de la capa externa del colmillo, que está laminado en círculos concéntricos. La capa laminada proporcionaba el mejor material para trabajar con las técnicas auriñacienses; el núcleo interno, sin laminar y de suma dureza, se desechaba o, como en Alemania, se empleaba para esculpir estatuillas de animales.

Una vez conseguidos los bastones de marfil, se rebajaban, raspándolos, hasta convertirlos en varillas del grosor de un lápiz. Cada varilla se segmentaba mediante incisiones en redondo, a intervalos de uno a dos centímetros. Los segmentos se separaban, entonces, para formar los tacos de los que la labor ulterior obtenía las cuentas; estos tacos se han recuperado a centenares. En el punto de fractura entre fragmentos, las capas finas del marfil quedaban siempre perpendiculares a la dirección final del orificio de la cuenta. La elección de la dirección era intencionada y hecha de modo que un extremo del taco pudiera rebajarse quitando las láminas exteriores, primero en un plano y después en el otro.

Mediante este proceso de adelgazamiento se obtenía una cuenta con la mitad superior delgada (tronco) y la mitad inferior, redondeada, más gruesa (bulbo). En esta fase, el taco presenta cierta semejanza con determinados tipos de dientes de animales, particularmente los caninos atrofiados del ciervo común y del reno; esta imitación constituía, a mi parecer, la finalidad del proceso de fabricación. (Como veremos, la imitación de formas y diseños naturales parece haber sido el distinti-



4. FIGURA ESCULPIDA, hallada en el yacimiento arqueológico alemán de Vogelherd. Se trata de un felino; eso se cree, en parte, por la forma de la oreja, claramente visible. El pelaje se representa mediante el punteado. La figura tiene una antigüedad de unos 32.000 años y está tallada en marfil de mamut.

vo de los sistemas de representación del Auriñaciense temprano.) El adelgazamiento del taco producía, en la inmensa mayoría de los casos, una parte superior de dos centímetros de espesor o casi, que se perforaba luego. El agujero se hacía en la zona de unión entre el tronco y el bulbo.

Después de perforado, el objeto entero era raspado y pulido con esmero. Estos procedimientos (que no se asocian en general con la técnica paleolítica) reducían a menos de la mitad la masa original de marfil. En particular, el tronco quedaba casi eliminado por completo, y el bulbo, redondeado y alisado. Tras la observación del producto terminado, la gente suele preguntarse cómo lograban los auriñacienses unos agujeros tan delicados. La verdad es que, al abrir el agujero primero y después pulir el taco en derredor, estaban enmascarando su incapacidad para conseguirlo.

¿Cómo se llevaban estas creaciones? Es posible que se ensartaran en collares o brazaletes. Cabe también que se prendieran en la ropa, cosidas, formando dibujos o motivos. Ahora bien, el examen minucioso de las cuentas nos

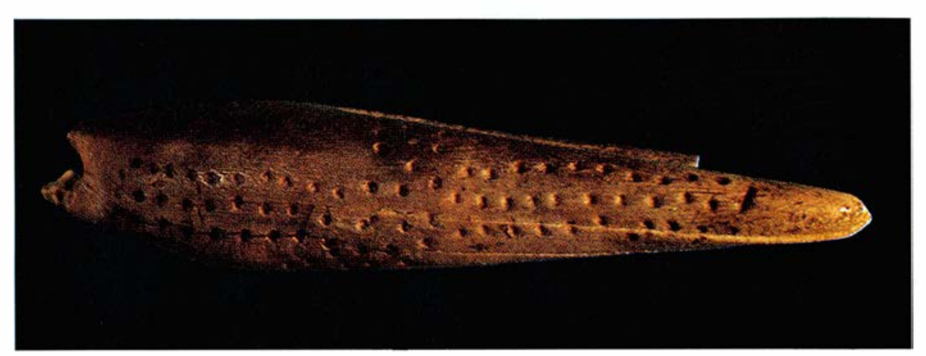
5. FIGURA GRABADA en un bloque plano de caliza. Se interpreta en general como una cabeza de caballo. La otra figura, a la derecha, parece más abstracta. El bloque, hallado en Francia, en el yacimiento Abri Cellier en 1927, fue grabado hace unos 32.000 años. (Musée National de Préhistoire, Les Eyzies-de-Tayac.)

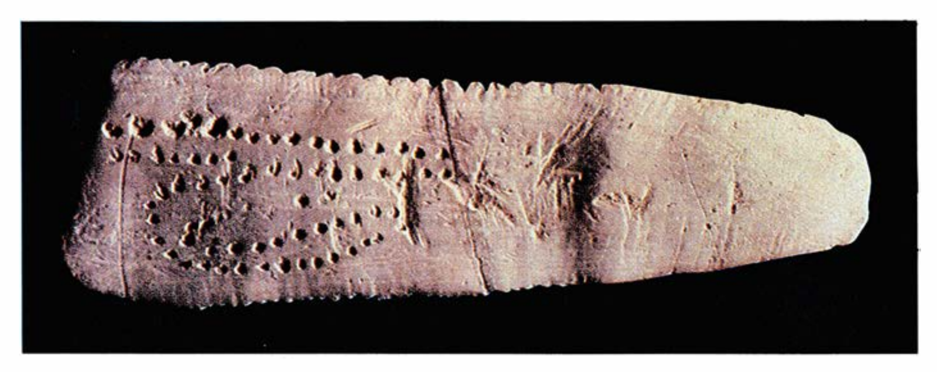
revela que la mayoría de ellas se hallan intactas. Si se hubieran cosido a la ropa una a una, lo natural sería que, para perderse, se tuvieran que romper. A veces aparecen por parejas en un mismo sitio, lo que sugiere pinzas de orejas o pendientes. Hay también cuentas acodadas que pueden haber sido botones, o, una vez más, pinzas de orejas. Indudablemente, habría métodos distintos de sujeción a tenor de los tipos de objetos, pero la realidad nos fuerza a reconocer que, de momento, no sabemos cómo se llevaban los adornos más antiguos.

Tampoco podemos los arqueólogos saber exactamente lo que la aparición repentina, casi explosiva, de estos adornos significa en el desarrollo social durante la edad de Hielo. La información que las sociedades primitivas actuales ofrecen nos señala, sin embargo, algunas pistas. En estas sociedades, los adornos contribuyen a definir y manifestar la identidad social. El sexo, la función social, el nivel económico y la afiliación a un grupo, todo ello se expresa mediante el adorno y cualquier otro tipo de decoración (tatuajes, por ejemplo) del cuerpo. Terence Turner, de la Universidad de Chicago, describe el cuerpo en una sociedad moderna como un "escenario simbólico" en que se representa el drama de la socialización. Este drama simbólico es un fenómeno humano universal que se encuentra en todas las sociedades conocidas.

Si el adorno es un vehículo para crear y representar identidades sociales, ¿qué significa su primera aparición? Parece como si la pregunta tuviera dos respuestas generales. En razón de la primera, la aparición de los adornos corporales está vinculada a la elaboración de las propias categorías sociales. En otras palabras, fue durante el Auriñaciense cuando se manifestaron institucionalizadas, por primera vez, las diferencias de posición social. De acuerdo con la segunda, el Auriñaciense inicial fue el período en que las técnicas de representación se adaptaron a la tarea de encarnar las nacientes distinciones sociales. Ahora bien, una explicación no excluye la otra; es posible que nuevas identidades sociales se desarrollasen al mismo tiempo que los métodos para manifestarlas.





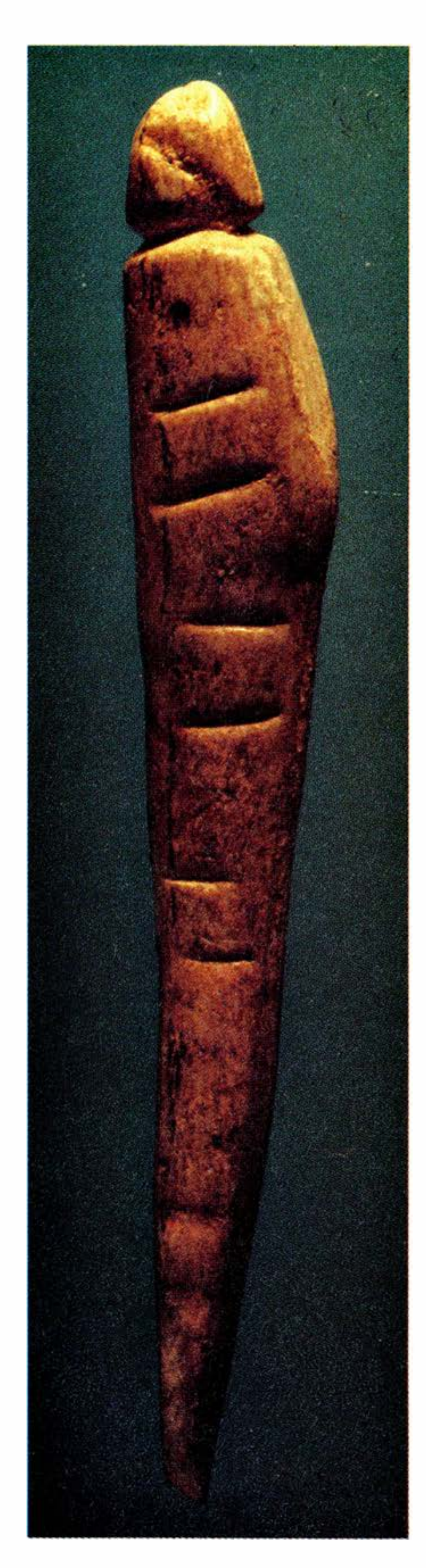


6. MEANDROS DE PUNTEADOS como éstos aparecen en muchos objetos auriñacienses. Se les atribuye unos 32.000 años de antigüedad. Proceden de Abri Blanchard, en el suroeste de Francia. El del centro ha sido interpretado por algunos antropólogos como un pez o una foca. Alexander Marshack ha sostenido que las marcas incisas en la placa de la foto inferior constituyen un calendario lunar. Sin embargo, la presencia de marcas semejantes en otros objetos auriñacienses sugiere que la intención era estética, no calculadora.

Para nuestra desgracia, el registro arqueológico –sobre todo en ausencia de enterramientos– no permite distinguir con precisión las diversas posibilidades. Aun así, es claro que el Auriñaciense inicial asistió a avances considerables en lo concerniente a técnicas de representación. Las estaciones auriñacienses más ricas en ornamentos corporales son las mismas que encierran algunas de las obras de arte más antiguas que se conocen, en forma de placas de caliza grabadas y pintadas, esculturas en marfil de mamut y objetos de hueso, asta, marfil y piedra decorados con imaginería enigmática, aunque preñada de intención.

Las representaciones gráficas más primitivas ofrecen formas naturales y otros diseños sencillos, repetitivos, que parecen más abstractos. Las figuras comprenden, por un lado, grabados y pinturas de animales, y, por otro, grabados que se consideran representaciones de órganos genitales femeninos. Aunque muchos arqueólogos no aceptan tal interpretación, ésta ha recibido cierto apoyo de dos claras figuras fálicas: una escultura en cuerno de animal y un grabado sobre caliza. Entre los motivos más abstractos hay series de signos en forma de X, incisiones y punteados (puntos hechos a escoplo). Estas figuras abstractas se repiten en sucesivas estaciones a lo largo de extensas regiones, lo cual sugiere que eran señales y símbolos compartidos por los miembros de entidades sociales regionales que podrían haberse originado durante el Auriñaciense.

El autor sostiene la hipótesis según la cual algunos incluso de los motivos de aspecto más abstracto podrían ser representaciones de temas naturales. Uno de los objetos auriñacienses decorados más conocidos es una placa de marfil del yacimiento de Abri Blanchard en el suroeste de Francia. Una de las caras de la placa ofrece una serie de punteados que el investigador Alexander Marshack ha interpretado como un primitivo calendario lunar. Muchos arqueólogos ponen en duda esta interpretación, en parte porque la de Abri Blanchard y otras estaciones adyacen-



7. FIGURA ANTROPOMORFA, representación probable de una mujer, tallada en marfil de mamut. De apenas cinco centímetros de altura, la figura se descubrió en la estación francesa Abri Cellier. Se distinguen claramente la cabeza y el contorno del pelo. Las incisiones emparejadas son corrientes en los objetos auriñacienses; se ignora su significado.

tes han proporcionado muchos objetos con motivos similares, que no parecen tener función alguna relacionada con un calendario. Parece más razonable (y no menos significativo en términos evolutivos) pensar que su intención era estética, no calculadora.

Que yo sepa, nunca se ha tenido en cuenta la posibilidad de que la placa de Abri Blanchard sea en realidad representación de algo. Y, sin embargo, el material de un yacimiento próximo, Abri de la Souquette, apunta hacia esta última hipótesis. En Abri de la Souquette se han encontrado cinco colgantes de marfil cubiertos de filas de punteados. Al estudiarlos en detalle me sorprendió su semejanza con motivos observados en conchas marinas del Atlántico de aquel mismo yacimiento. De hecho, los colgantes eran fieles representaciones de las conchas, que evidenciaban los mismos meandros punteados. Puede ser que muchos objetos punteados, si no todos, representen la traslación de motivos naturales a nuevos contextos, en los que se convirtieron en formas de decoración.

La transferencia de cualidades de uno a otro contexto es parte esencial de la construcción de metáforas, y otro objeto de Abri de la Souquette parece aún más directamente metafórico que los colgantes. Me refiero a una punta de lanza, de base hendida, construida en asta de reno. Tales puntas son corrientes en estaciones auriñacienses, pero ésta ha sufrido una curiosa modificación. Se ha rebajado el extremo apuntado, recordando la forma de un hocico. Un orificio sumamente minúsculo atraviesa la pieza en el sitio que correspondería al ojo. La base hendida no difiere mucho de un par de aletas. El conjunto evoca de forma sutil, aunque convincente, una foca.

Si andamos en lo cierto, la punta sería una analogía material, o metáfora, del mamífero marino. En este ejemplo vemos la transferencia de atributos animales (hocico, ojo, aletas) a un utensilio que originariamente tenía ciertas semejanzas formales con el animal (principalmente en su base, que recuerda a unas aletas). Es curioso que se hayan encontrado restos de una foca en otro yacimiento del Auriñaciense inicial a sólo cien metros de distancia. La Souquette se halla a 200 kilómetros del mar, y aunque se sabe que las focas remontan a nado los ríos alejándose del mar, su presencia en aquel lugar durante el Auriñaciense habría sido, sin duda, motivo de gran curiosidad.

La punta de lanza "foca" (en la hipótesis de que de esto se trate) constituye un caso excepcional en los yacimientos franceses. Las escasas figuras existentes allí están casi siempre grabadas en caliza y son tan toscas por lo general, que resultan difíciles de identificar. En cambio en tres yacimientos de Alemania de comienzos del Auriñaciense (Vogelherd, Geissenklosterle y Hohlenstein-Stadel) se han desenterrado unas 20 estatuillas de marfil, marcadas a menudo con motivos abstractos. Algunas de ellas alcanzan tal realismo y están tan bien modeladas, que los estudiosos dan por segura la existencia de prototipos anteriores, pendientes aún de descubrir.

Los investigadores que buscan prototipos parten de la idea de que el arte más primitivo debe ser sencillo y de aspecto infantil. El registro arqueológico del Auriñaciense indica que el dibujo más primitivo efectivamente es así. La escultura de la misma época, sin embargo, es naturalista y expresiva. Quizá resultaba más fácil reducir un animal a un modelo a escala tridimensional que dibujarlo en dos dimensiones. Diríase que los artistas primitivos tardaron miles de años en descubrir los convencionalismos y artificios de la representación bidimensional tal y como se ven en Lascaux, pintada diecisiete mil años después de las primeras figuras del Paleolítico Superior.

Una vez examinados algunos de los avances fundamentales del Auriñaciense en el terreno de la tecnología, el ornamento corporal y los modos de representación, resulta obligado preguntar si puede establecerse un nexo entre todos ellos. Creo que la respuesta es afirmativa, por lo menos como hipótesis. En la raíz de todos estos adelantos hay una creciente capacidad de pensar y comunicarse por medio de imágenes visuales específicas. Esta capacidad creciente podría explicar el florecimiento del progreso tecnológico que caracteriza al Auriñaciense. Heidi Knecht, de la Universidad de Nueva York, ha señalado recientemente que una naciente consideración de las posibilidades de la figuración por medio de imágenes de dos y tres dimensiones estimuló el desarrollo rápido de nuevos instrumentos y armas.

Las innovaciones en el dominio de la imaginación espacial y visual no son independientes del adorno corporal. Adornar el cuerpo es un modo de construir y objetivar una serie de distinciones sociales que, sin ello, no las descubriríamos nunca. Las categorías de

personas definidas socialmente no tienen equivalencias físicas obvias, a menos que los seres humanos se las otorguen. La abstracción de ciertas propiedades formales de objetos naturales, bien por vía metonímica o metafórica, y su asignación a ciertos grupos de personas, permitía a los Auriñacienses poner de manifiesto gradaciones de posición social, así como la identidad de todo el grupo, distinciones de las que no se conocen precedentes antes del Auriñaciense.

Esta nueva capacidad de aislar atributos y transferirlos a otro contexto tendría profundas repercusiones. Permitiría transferir propiedades tales como "agudeza" o "provisto de aletas", de contextos naturales a otros tecnológicos. Una vez abstraído el concepto de "provisto de aletas" de su contexto natural, el fabricante de herramientas auriñaciense podía concebir una gama de diseños para una punta de lanza con aletas. Este tipo de pensamiento visual es tan corriente hoy en medios técnicos que nos resulta difícil darnos cuenta de que pudo tratarse de un paso adelante relativamente reciente y revolucionario en el campo de la cultura.

En la obra de Brooke Hindle, especialista en historia de la ciencia durante muchos años en la Universidad de Nueva York, se considera el carácter revolucionario que el desarrollo del pensamiento visual pudo tener. Sus estudios de la Revolución Industrial ponen de relieve el significado de la manipulación de la imagen. Señala que casi todos los grandes inventores industriales pensaron en términos de imágenes y acentúa el importante papel de la "explosión" del dibujo en las innovaciones técnicas. Quizá no sea una coincidencia que las primeras imágenes representativas apareciesen durante uno de los principales períodos de innovación tecnológica y social de toda la historia de la humanidad.

De una forma u otra, el lenguaje debe encontrarse detrás de todas estas innovaciones. Para servir de base a un nuevo cambio social y técnico, las imágenes tienen que ser compartidas y comunicadas. El lenguaje pudo haber existido antes del Paleolítico Superior, quizá de una forma concreta, relacionada íntimamente con objetos naturales específicos. Los avances revolucionarios de aquella época presuponen, sin embargo, innovaciones en el manejo y compartición de las imágenes. Aunque para estas innovaciones determinados tipos de instrumental neuronal eran, sin duda, un requisito previo, el comienzo de las representaciones icónicas no ha de interpretarse como el paso de un umbral neurológico. Al contrario, fue, con más probabilidad, una transición cultural, basada en la implantación de convencionalismos representativos y compartidos.

La primera comprensión de estas posibilidades fue, por lo menos, tan significativa, desde el punto de vista evolutivo, como el uso inicial del fuego o de los útiles de piedra. Las consecuencias para la capacidad de inventiva hubieron de ser trascendentales. Comparado con los Neanderthales precedentes, que apenas si desarrollaron innovación tecnológica alguna durante más de 100.000 años de existencia, el pueblo auriñaciense supo percatarse con creciente rapidez de un amplio espectro de posibilidades sociales, tecnológicas y míticas. Gran parte de este rápido progreso evolutivo, que hoy continúa, se debe sin duda a la formación, manipulación y comunicación de imágenes.





8. PUNTA DE LANZA DE BASE HENDIDA. Representa, verosímilmente, una foca. La base, destinada en origen a encajarla en un astil de madera, pudo simbolizar unas aletas (*arriba*). Se ha recortado y perforado el extremo donde se localizaría el ojo (*abajo*). La punta de lanza, de asta de reno, se encontró en el yacimiento de Abri de la Souquette, cerca de Sergeac, en el suroeste de Francia. No deja de resultar curioso que los restos de una foca se encontrasen en otro yacimiento auriñaciense a menos de 100 metros de distancia.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

AURIGNACIAN SIGNS, PENDANTS AND ART OBJECTS IN CENTRAL AND EASTERN EUROPE. J. Hahn en *World Archaeology*, vol. 3, n.º 3, págs. 252-266; febrero de 1972.

THE CREATIVE EXPLOSION. J. E. Pfeiffer. Cornell University Press, 1985.

DARK CAVES, BRIGHT VISIONS: LIFE IN ICE AGE EUROPE. Randall White. American Museum of Natural History/W. W. Norton & Company, 1986.

THE ORIGINS OF IMAGE MAKING. Whitney Davis en *Current Anthropology*, vol. 27, n.º 3, págs. 193-216; junio de 1986.

PRODUCTION COMPLEXITY AND STANDARDISATION IN EARLY AURIGNACIAN BEAD AND PENDANT MANUFACTURE: EVOLUTIONARY IMPLICATIONS. R. White en *The Human Revolution: Behavioural and Biological Perspectives on the Origins of Modern Humans*, dirigido por Christopher Stringer y Paul Mellars. Edinburgh University Press, en prensa.

TOWARD A CONTEXTUAL UNDERSTANDING OF THE EARLIEST BODY ORNAMENTS. R. White en *Patterns and Processes in Later Pleistocene Human Emergence*, dirigido por Erik Trinkaus. Cambridge University Press, en prensa.

Zeolitas sintéticas

En los últimos 30 años, las zeolitas, análogos artificiales de los minerales porosos, han revolucionado la industria petrolífera. La búsqueda de nuevas formas de aplicación comercial continúa sin cesar

George T. Kerr

En 1756, el barón Axel F. Cronstedt, mineralogista sueco, observó con sorpresa que ciertos minerales, al calentarse lo suficiente, burbujeaban como si estuvieran hirviendo. Los denominó zeolitas, de las palabras griegas *zeo*, hervir, y *lithos*, roca. Desde entonces, se han descubierto unas 40 zeolitas minerales o naturales.

El análisis químico y estructural muestra que las "piedras hirvientes", que hoy sabemos que están formadas principalmente por silicio, aluminio y oxígeno, y que albergan una amplia gama de otros elementos, son cristales muy porosos, surcados por canales submicroscópicos. Dichos canales contienen agua (lo que explica su ebullición a altas temperaturas), que puede eliminarse –por calentamiento combinado con otros tratamientos– sin alterar su estructura cristalina. Las zeolitas anhidras admiten múltiples aplicaciones; verbigracia, la de actuar como tamices moleculares: "filtros inversos" que, al contrario que los filtros al uso, capturan las moléculas más o menos pequeñas y permiten el libre flujo de las grandes.

A principios del siglo xx, las insólitas propiedades de las zeolitas estimularon los esfuerzos de los químicos por sintetizar sus cristales. Muchos de ellos tuvieron éxito y descubrieron, incluso, estructuras inexistentes en la naturaleza. Las formas sintéticas han adquirido tal importancia comercial, que se producen en mayor cantidad que buena parte de los restantes materiales cristalinos.

Así, ciertas zeolitas sintéticas han revolucionado algunos aspectos de la industria petrolífera. En ese ámbito, la producción mundial de gasolina por fraccionamiento catalítico de grandes moléculas de hidrocarburos de petróleo depende, hoy, de la actividad catalítica de las zeolitas. El petróleo crudo se separa, primero, por destilación, en fracciones, obteniendo desde productos ligeros como metano, propano y gasolina (constituidos por moléculas pequeñas) hasta productos pesados como gasóleo y asfalto (constituidos por moléculas más pesadas). Después, las moléculas del gasóleo se someten a una nueva separación para formar gasolina sintética.

Las zeolitas producen entre un 10 y un 20 por ciento más de gasolina que los antiguos catalizadores y, además, de una forma más limpia y a temperatura más baja y económica. En consecuencia, no debe sorprendernos que los investigadores continúen buscando nuevas formas que posean características que las hagan explotables comercialmente.

Cualquier zeolita se distingue de las otras por diferencias estructurales en su celda unidad; por tal se entiende el menor grupo de átomos que, juntos, presentan todas las propiedades físicas y químicas de un cristal. El armazón de cada celda unidad de zeolita está constituido por bloques tetraédricos que pueden disponerse según distintas combinaciones.

Los átomos de oxígeno constituyen los cuatro vértices de cada tetraedro. Estos átomos se hallan estrechamente ligados a un átomo de silicio (Si) o aluminio (Al), al cual encierran. Los oxígenos de los vértices comparten dos tetraedros, por lo que podemos decir que cada átomo de silicio o de aluminio interior a un tetraedro está enlazado a sus cuatro átomos vecinos a través de un oxígeno intermedio. Una ley natural, conocida como regla de Loewenstein, impide que dos átomos de aluminio compartan el mismo oxígeno, por lo que el número de átomos de aluminio en una celda unidad es siempre menor, o como máximo igual, al número de átomos de silicio.

Antes de que los átomos de aluminio se unan al armazón, son iones a los que les faltan tres de sus electrones originales. Por tanto, pueden acomodar fácilmente electrones proporcionados por tres de sus átomos de oxígeno enlazados, pero el electrón donado por el cuarto oxígeno introduce una carga negativa, o aniónica, en el átomo de aluminio. Esta carga negativa se compensa con un catión, o ion cargado positivamente, de un metal alcalino o de un grupo alcalino-térreo de la tabla periódica; a menudo sodio (Na^+) o potasio (K^+), en el primer caso, y calcio (Ca^{2+}) o magnesio (Mg^{2+}), en el segundo. Los cationes permanecen cerca de los aniones, pero se encuentran en canales cristalinos cuyos diámetros, en minerales naturales, oscilan entre los 2,5 angstrom (diezmillonésimas de milímetro), en la sodalita, y los ocho angstrom de la faujasita.

Los cationes desempeñan un papel relevante en muchas de las funciones de las zeolitas y ayudan a atraer moléculas de agua que, si bien no tienen carga eléctrica neta, sí, en cambio, son polares: uno de los extremos posee una pequeña carga negativa mientras que el otro la tiene positiva. Los cationes no forman parte del armazón, por lo que, bajo condiciones adecuadas, pueden intercambiarse por otros cationes. Este

GEORGE T. KERR, miembro del comité editorial internacional de la revista *Zeolites*, ha investigado la síntesis y las propiedades de las zeolitas en la empresa Mobil desde 1956 hasta su jubilación, en 1985. Se doctoró en química orgánica por la Universidad estatal de Pennsylvania, en 1952. Desde que entró en la compañía Mobil, se convirtió en uno de los primeros investigadores que dedicó todos sus esfuerzos al estudio de las zeolitas.

intercambio no afecta a la estructura cristalina.

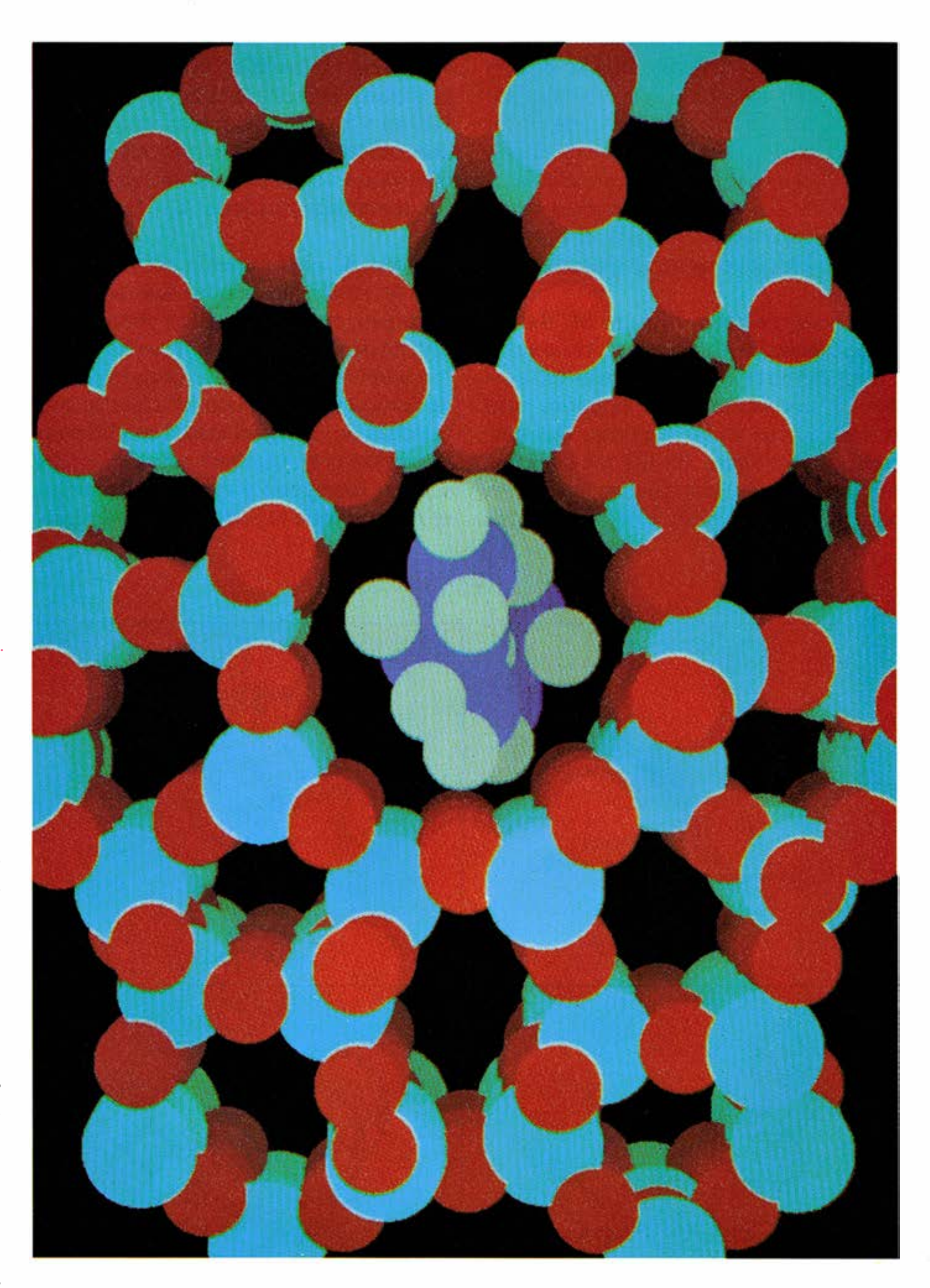
La capacidad de intercambio iónico de las zeolitas minerales fue, quizá, la primera propiedad reconocida en el comercio. Su descubrimiento en la década de 1850 condujo, finalmente, a la explotación de estos minerales como ablandadores de agua. Los iones de calcio y magnesio endurecen el agua, es decir, impiden la formación de espuma cuando se mezcla con jabón. Cuando el agua pasa a través de zeolitas que tienen incorporados cationes de sodio, las zeolitas se desprenden del sodio y toman un ion de calcio o de magnesio por cada dos átomos de sodio cedidos. (Debido a la acidez del agua del grifo, que ataca fácilmente el aluminio de las zeolitas, las zeolitas ablandadoras de agua se han substituido, en general, por materiales más resistentes a los ácidos.) La zeolita mineral clinoptilolita se ha seleccionado, para otra aplicación, como intercambiador iónico, con el fin de extraer elementos radiactivos de los desechos nucleares.

En 1932, James W. McBain, de la Universidad de Stanford, centró su atención en otra propiedad de las zeolitas: su carácter filtrante. Se ha observado que la zeolita chabazita adsorbe –toma y retiene– vapores de moléculas, relativamente pequeñas, como las de agua, ácido fórmico, alcoholes metílicos y etílicos, pero no adsorbe ni acetona, ni éter, ni benzeno, cuyas moléculas son mayores. McBain descubrió que la selectividad estaba condicionada por el tamaño de los poros del cristal; de ahí que acuñara el término tamiz molecular. Las propiedades de tamiz molecular de la chabazita han servido para impedir que el dióxido de azufre gaseoso y otros contaminantes escapen a la atmósfera a través de las chimeneas.

Desde 1932 se han descubierto muchas aplicaciones más de las zeolitas naturales. Así, constituyen excelentes desecadores, o agentes desecantes: cuando se elimina su propia agua, adsorben rápidamente agua u otros fluidos polares del ambiente. A pesar de ello, en el último medio siglo, las zeolitas naturales se han utilizado menos que sus variedades sintéticas, por creerse, sobre todo, que escaseaban. Hoy parece, sin embargo, que algunas zeolitas minerales abundan, razón por la cual se ha avivado el interés hacia las mismas.

Los primeros y más cuidadosos estudios sistemáticos sobre zeolitas sintéticas fueron realizados por Richard M. Barrer, que desarrolló la mayor parte de su trabajo en el Colegio Imperial de Londres. Sus esfuerzos, a finales de los años treinta, dieron por resultado la preparación de varias estructuras de zeolita parecidas a los minerales naturales y la síntesis de algunas estructuras desconocidas en la naturaleza.

El trabajo de Barrer no condujo directamente a productos de aplicación comercial, pero estimuló a los investigadores de la División Linde, empresa filial de la Union Carbide, a emprender, en 1948, los estudios que abrieron el camino de la síntesis de zeolitas. La compañía estaba empeñada en separar los componentes del aire por destilación, cuando Robert M. Milton y Donald W. Breck, éste ya fallecido, se preguntaron si los tamices moleculares



1. MODELO DEL CRISTAL DE LA ZEOLITA ZSM-5, representado junto con una molécula del hidrocarburo para-xileno (*en gris* y *azul*) en un canal submicroscópico del cristal; se destaca así la porosidad común a todas las zeolitas. El ZSM-5 se emplea para la "catálisis morfoselectiva", que convierte el tolueno (un subproducto del refinado del petróleo) en para-xileno y benceno, ambos de interés comercial. Las moléculas de tolueno que entran en el cristal se alteran para dar varios productos, pero sólo el benceno y el para-xileno son lo suficientemente pequeños y compactos como para difundirse por los canales y escapar; los otros productos quedan atrapados hasta que, a su vez, se alteran adecuadamente. Las esferas rojas representan átomos de oxígeno; las azul claro, átomos de aluminio o silicio. Hay cationes (iones dotados de carga positiva) responsables de la catálisis, pero son demasiado pequeños para poderse recoger en la ilustración. La imagen se ha realizado con el programa Chem-X, desarrollado y distribuido por Chemical Design de Oxford.

realizarían el proceso de manera más eficaz.

Partieron del planteamiento experimental de Barrer. Había éste trabajado con mezclas de reacción y condiciones que simulaban las que originaban zeolitas minerales, que se forman sólo en presencia de agua y a temperaturas de 100 grados centígrados o superiores. Los yacimientos suelen estar cerca de los volcanes, lugares que proporcionan calor, además de silicio, aluminio y oxígeno, en forma de alúmina (Al_2O_3) y sílice (SiO_2). Estos minerales se disuelven en una solución, extremadamente básica o cáustica (*p*H por encima de 9), que se crea cuando el agua de lluvia lava los elementos alcalinos y alcalinotérreos de las rocas y los acarrea hacia las aguas subterráneas; con el tiempo, los elementos se agregan para formar cristales.

En consecuencia, Richard M. Barrer expuso mezclas similares a presiones y a temperaturas elevadas (hasta 400 grados C), necesarias, en su opinión, para la formación de las zeolitas. Sin embargo, los canales de los cristales resultantes eran demasiado pequeños para separar el aire; esto impulsó al grupo de Milton y Breck a comprobar si podían obtenerse mejores resultados con mezclas de reacción ligeramente distintas y a menor temperatura y presión.

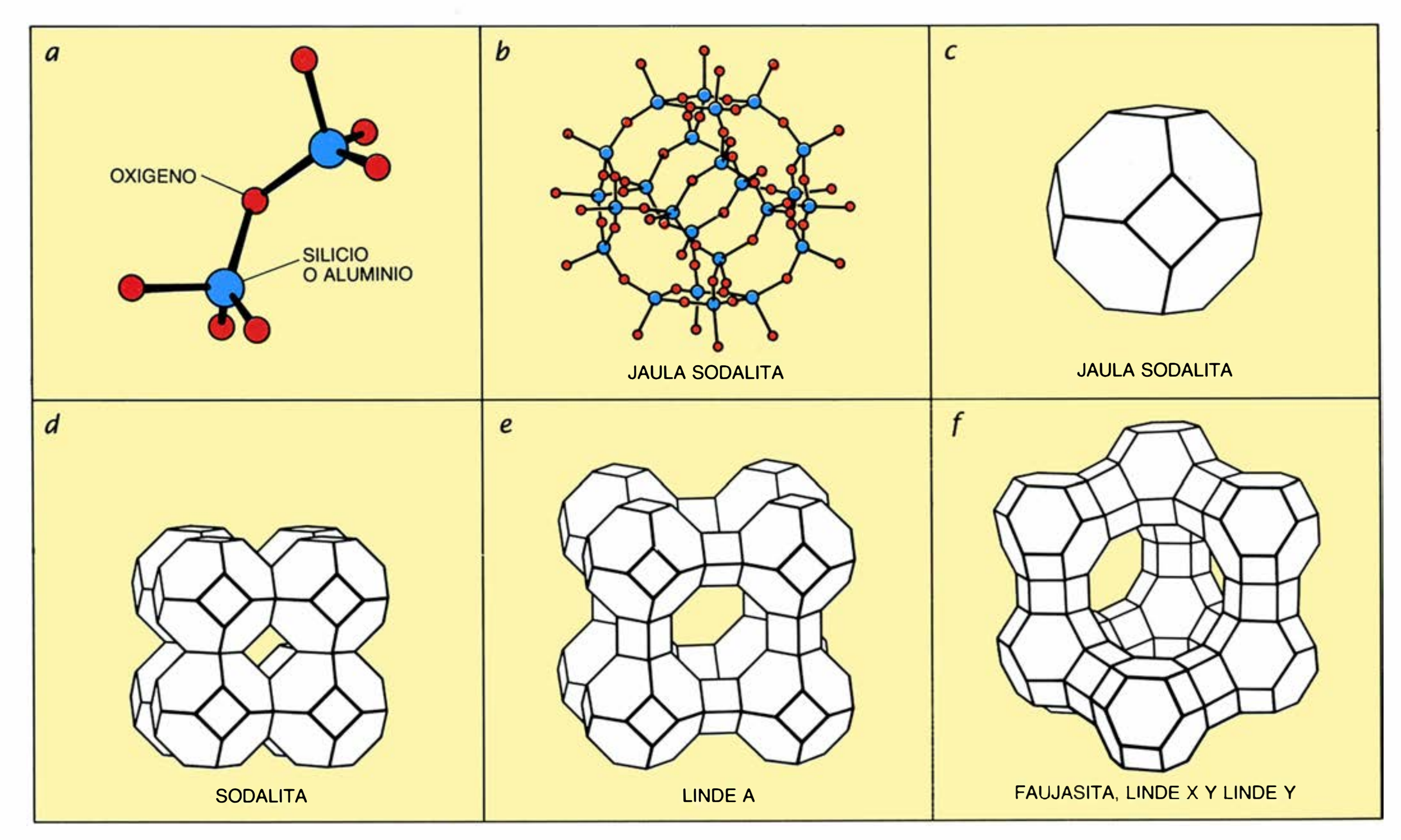
En aquel tiempo, los investigadores podían, igual que hoy, jugar con las proporciones de los materiales de sus mezclas iniciales, con la temperatura y la presión, para crear zeolitas de distinta composición o estructura (o ambas cosas) –y podían reproducir sus fórmulas–; pero no podían predecir qué sucedería al cambiar una fórmula de determinada manera. Ello no obstante, Milton y Breck elaboraron una zeolita que presentaba una estructura nueva; más tarde comprobaron su alto valor. La denominaron Linde A.

Linde A, que contenía sólo cationes de sodio, no resultó adecuada, al principio, para separar los componentes del aire; ahora bien, cuando se intercambiaban dos de los grandes iones de sodio que atascaban los canales con cationes de calcio, el cristal modificado se convertía en bastante adecuado para separar nitrógeno y oxígeno. También se observó que la forma cálcica de Linde A podía eliminar, de las gasolinas, ciertas moléculas de hidrocarburo perjudiciales.

Cuando la gasolina natural se separa del petróleo crudo por destilación, contiene varios hidrocarburos de tamaño similar, pero de forma distinta. Algunos constan de cadenas moleculares lineales, mientras que otros son cíclicos (en forma de anillo) o ramificados. Las formas de los componentes revisten su interés, porque la fracción de cadenas lineales es más explosiva al quemar –da "golpes"–, lo que perjudica el funcionamiento de los motores. La forma cálcica de Linde A, modificada para adsorber los hidrocarburos de cadena lineal, da lugar a un producto de mayor calidad.

La nueva zeolita comenzó a comercializarse a mediados de los años cincuenta; hoy continúa utilizándose para separar los componentes del aire y para mejorar la gasolina. Linde A se ha usado también como desecante; por ejemplo, para eliminar el agua de los sistemas hidráulicos de los frenos de autobuses y camiones.

Por la misma época en que los investigadores de la Union Carbide de-



2. ARMAZON DE LAS ZEOLITAS, constituido por bloques tetraédricos. En algunos casos aparece una "jaula de sodalita" característica. Los cuatro vértices tetraédricos están ocupados por átomos de oxígeno (*naranja*) y en el centro se sitúa un átomo de silicio o aluminio (*azul*); cada oxígeno está compartido por dos tetraedros (*a*). En las representaciones de la "jaula de sodalita" (*b*), que consta de 24 tetraedros, y en las zeolitas en general, el dibujo de los átomos se omite (*c*): las líneas rectas unen los centros de los tetraedros, de forma que cada vértice representa un átomo de silicio o de aluminio y el punto medio de cada línea simboliza un átomo de oxígeno. Las "jaulas de sodalita" se encuentran en todas las estructuras aquí dibujadas: la propia sodalita (*d*), el cristal sintético Linde A (*e*) y un grupo de cristales de estructuras similares, como la faujasita mineral y las zeolitas sintéticas Linde X y Linde Y (*f*). (Los dibujos son de Gabor Kiss.)

sarrollaron Linde A, produjeron también Linde X, que se convertiría en la primera zeolita comercializada que actuaba como catalizador. Este material tenía la misma estructura que la faujasita, un mineral poco abundante y de poro grande, con una relación de silicio-aluminio distinta; lo mismo que Linde A, sólo podía sintetizarse directamente en la forma de cationes sódicos.

Al principio, parecía que Linde X no tenía aplicaciones inmediatas, pero cuando Union Carbide elaboró muestras disponibles, muchos investigadores aprovecharon la ocasión para estudiarla. Entre ellos, estaba Robert W. Schiessler, que ahora trabaja en la empresa Mobil Research and Development Corporation. Schiessler abordó no sólo la investigación de Linde X, sino que también estudió en profundidad las zeolitas en general. Esperaba que los expertos de Mobil sintetizaran zeolitas con nuevas composiciones y estructuras y, más específicamente, que descubrieran procesos para elaborar zeolitas útiles para la fabricación de gasolina sintética.

El objetivo pareció viable, ya que el catalizador utilizado en aquel entonces para la separación del gasóleo era químicamente similar a las zeolitas: incluía silicio, aluminio, oxígeno y, al menos en su estado inicial, sodio; a diferencia de las zeolitas, este catalizador era amorfo.

Entré en la empresa Mobil en 1956. Poco después, Edward J. Rosinski, de la compañía, y yo mismo nos propusimos tratar de activar Linde X (cuyos canales parecían de magnitud suficiente para dejar paso a los hidrocarburos), de forma similar a la que normalmente lo hacía el material amorfo. Se bañaban en una solución rica en aluminio e intercambiaban así los cationes de sodio, que eran "venenos" que entorpecían la catálisis, los cationes de aluminio (Al^{3+}). En esencia, este intercambio convertía el material amorfo en un ácido: algo que aporta iones de hidrógeno (H^+) o protones simples. Esta acidez es fundamental para la separación catalítica de los hidrocarburos, aunque todavía no está clara la interacción entre los protones y las moléculas de los hidrocarburos para romperlas. (Según parece, los iones de hidrógeno proceden de las moléculas de agua del gasóleo y se forman cuando los cationes de aluminio arrancan grupos hidroxilo [OH^-] del agua.)

El baño de aluminio parecía una buena idea para las zeolitas, pero el tratamiento se limitaba a taponar sus canales. Más tarde, nuestros colegas Jean M. Bourguet y F. David Hart decidieron también abordar el problema de la activación. Recordé entonces que los iones del elemento tierra rara cerio (Ce), que, como los cationes de aluminio tienen carga 3+, podía intercambiarse por los iones de sodio en el Linde X; ante una sugerencia mía, intentaron así dicho intercambio.

Hart realizó lo que creyó era el experimento que yo había aconsejado; sin embargo, resultó que la substancia que había adquirido como cerio puro estaba mal etiquetada y, en su lugar, contenía una mezcla de tierras raras. Sin embargo, el error no tuvo demasiada importancia porque, pese a ello, el experimento logró producir un catalizador activo en extremo. De hecho, para disgusto de todos, descomponía los hidrocarburos de manera demasiado drástica, produciendo metano y otros hidrocarburos ligeros en vez de gasolina.

Rosinski y Charles J. Plank, también de Mobil, vinieron en nuestro auxilio al sugerir que tratáramos con vapor las zeolitas de tierras raras y así reducir su actividad catalítica hasta el nivel deseado. (Tratar al vapor puede incrementar dicha actividad, pero hacerlo intensamente es destructivo.) Hacia 1962, nuestro trabajo se materializó en la versión comercial del primer catalizador basado en zeolitas que descomponía gasóleo, el Durabead 5; producía más gasolina que el catalizador amorfo usual.

Aún hoy no se sabe a qué atribuir exactamente esa mayor eficacia del catalizador Durabead 5. Caben varias explicaciones. Parece razonable suponer que el sistema de canales grandes y uniformes de la zeolita ofrecía una mayor superficie sobre la cual las moléculas del gasóleo podían interaccionar con los protones.

Durabead 5 constituyó un hito en la historia de las zeolitas sintéticas, pero su vida comercial duró sólo hasta 1964. A finales de los años cincuenta, Breck había sintetizado otra estructura del tipo faujasita, denominada Linde Y, con una relación silicio-aluminio entre 1,5 y 3, una relación más alta que en Linde X. Cuando los investigadores de Mobil concibieron una manera de intercambiar los cationes de tierra rara por cationes de sodio del cristal sintetizado inicialmente, la forma de tierra rara de Linde Y substituyó rápidamente a Linde X. Su contenido más alto en silicio y menor en aluminio lo hacía

más duradero. Los aluminios del armazón constituyen el enlace más débil en los catalizadores de zeolitas porque, a altas temperaturas, poseen menos estabilidad que los átomos de silicio y son susceptibles de ataque por parte del agua.

En los años setenta, se remplazó también la forma tierra rara de Linde Y; esta vez, por otra forma de Linde Y. La nueva variedad sigue siendo hoy el catalizador preferido para la descomposición del gasóleo, merced a su mayor estabilidad y menor susceptibilidad a ser destruida por el agua cuando se expone a altas temperaturas.

La mayor elasticidad de esta zeolita, llamada ultraestable, deriva de los cambios en el armazón cristalino que se dan durante el proceso de postsíntesis. Al principio, los investigadores intercambiaban los cationes de sodio de los cristales clásicos de Linde Y con iones amónicos (NH_4^+), calentando entonces los cristales. El calentamiento produce gas amoniaco (NH_3) que se forma y escapa de los cristales, dejando atrás iones de hidrógeno. A mediados de los años sesenta, descubrí que el tratamiento con vapor de esta forma hidrogenada de la zeolita se lleva una fracción de iones hidrógeno de los cristales y hace que un número igual de átomos de aluminio del esqueleto salte del armazón; tras lo cual, cada uno se enlaza con ocho átomos de oxígeno y se crean cationes octaédricos.

Las ventajas de la nueva configuración son dobles. Los átomos de aluminio quedan remplazados en el armazón por átomos de silicio más resistentes, y, además, los átomos de aluminio se hacen más resistentes al calor y al agua en la conformación octaédrica. La zeolita hidrogenada conserva su poder catalítico, aunque cierto número de iones de hidrógeno haya escapado, porque los cationes octaédricos de aluminio desempeñan casi el mismo papel catalítico que en los catalizadores amorfos (y que desempeñan los iones de tierra rara en Linde X y en la versión previa de Linde Y).

En las postrimerías de los años cincuenta, algunos de nosotros comenzamos, en Mobil, una serie de experimentos que conducirían, mediados los sesenta, a la producción comercial de otra zeolita sintética: ZSM-5 (las últimas dos iniciales son las siglas de Socony Mobil, que en aquel tiempo se hallaba integrada en la compañía). Esta zeolita conoce varias aplicaciones y, recientemente, ha adquirido especial relevancia en la conversión de metanol (alcohol de madera) en gasolina.

La creación de ZSM-5 culminó una serie de descubrimientos que empezaron cuando pensé en substituir todos o algunos de los iones alcalinos convencionales por los cationes amónicos cuaternarios en las mezclas de reacción que dan lugar a las zeolitas sintéticas. Se trata de iones de amonio normales, en los que los cuatro átomos de hidrógeno se han reemplazado por grupos orgánicos. Sus precursores usuales –hidróxidos amónicos cuaternarios o iones enlazados por grupos hidroxilo– poseen una basicidad tan fuerte en solución como los iones de sodio y potasio, pero los cationes amónicos cuaternarios son sensiblemente mayores que los iones de sodio o potasio. Por tanto, intuí que los iones mayores podían inducir la formación de zeolitas cuyas estructuras fueran lo bastante distintas de cualquier otra.

Escogí un ion (tetrametilamonio o TMA), que dio lugar a una zeolita de la cual George T. Kokotailo, de Mobil, demostró que tenía la misma estructura cristalina que Linde A, salvo en la celda unidad, que era menor, y en la relación silicio-aluminio, que era un poco más alta. La llamamos ZK-4, donde la K aludía a nuestras iniciales. (Por aquellos días Barrer y Patrick J. Denny, alumno suyo, describieron una estructura similar, preparada con los mismos cationes.) Animados al ver que el trabajo se orientaba en la dirección correcta, probamos con un ion más complejo, con el que logramos producir, con éxito, la primera y verdaderamente nueva estructura de zeolita sintetizada con iones amónicos cuaternarios: ZK-5.

En colaboración con Rosinski y nuestro colega Robert L. Wadlinger,

3. FRACCIONAMIENTO CATALITICO de los hidrocarburos por cristales de zeolita para producir gasolina y otros productos. Dicho proceso se realiza después de que el petróleo crudo se ha descompuesto por destilación en una gama de productos que van desde el metano (que tiene moléculas pequeñas) hasta el asfalto (en el que son grandes). Algunos de estos productos se enuncian a la izquierda de la ilustración. La fracción de gasóleo se vaporiza por contacto con partículas calientes (*puntos*) que contienen zeolita Linde Y. Junto con las partículas, el vapor asciende por un tubo llamado elevador del reactor, donde los hidrocarburos (que se difunden por los poros de la zeolita) se fraccionan. Encima del elevador, el vapor arriba a una torre de destilación que separa los fragmentos resultantes en virtud de sus respectivos tamaños: las moléculas menores forman gasolina y las más pesadas, gasóleo y aceites pesados que, en parte, se reciclan. Mientras tanto, las partículas catalíticas se preparan para su reciclado. Se tratan con vapor para eliminar los hidrocarburos y se transfieren al regenerador, donde el aire caliente quema un depósito carbonáceo, al que llamamos coque.

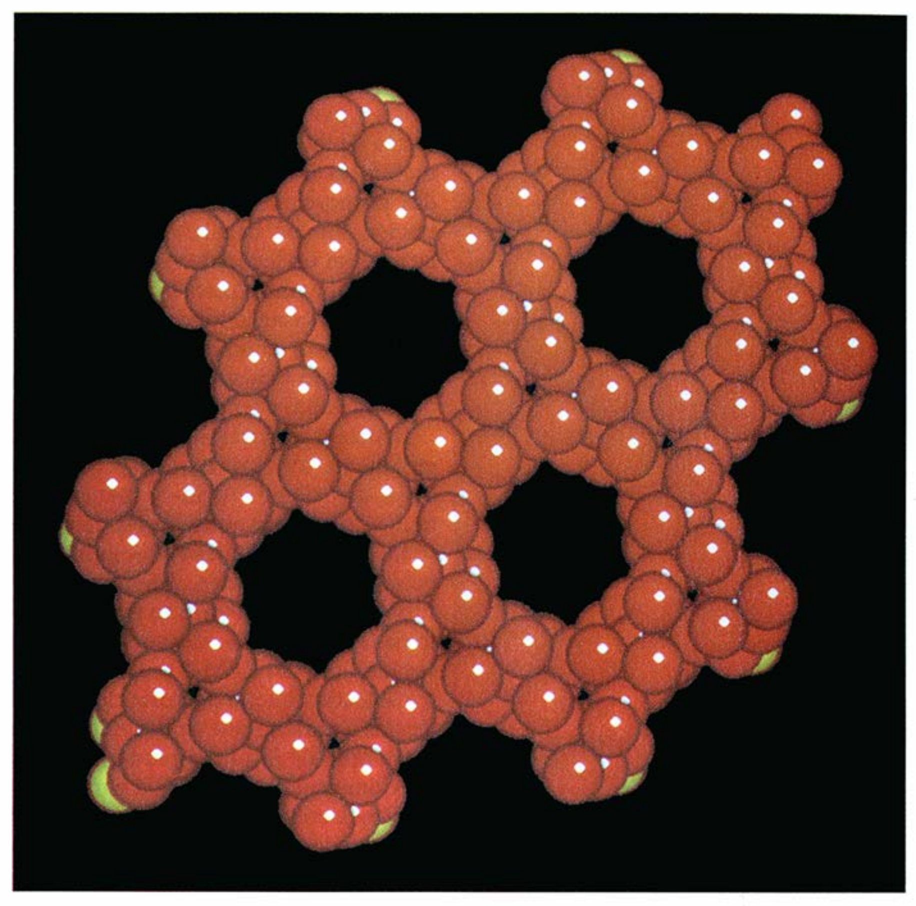
experimenté con otro ion más: el tetraetilamonio o TEA. El resultado, la zeolita beta, fue sorprendente: presentaba una relación silicio-aluminio que iba de 15 a 50, superando ampliamente la relación 5,5 de la mordenita, la zeolita mineral más rica en silicio. Era, también, algo hidrofóbica (repelente del agua), en claro contraste con las zeolitas naturales y con las primeras variedades sintéticas, ya que todas ellas atraen fuertemente al agua.

Muchos años después, en 1976, N. Y. Chen, de Mobil, ligó ambos descubrimientos. Demostró que, al aumentar la relación silicio-aluminio (con una disminución concomitante en el número de iones aluminio y, por tanto, de cationes disponibles para atraer agua), los cristales aumentaban su carácter hidrofóbico. Hasta el pasado año no se ha podido resolver la estructura beta; no debe sorprender a nadie que no se haya encontrado ninguna réplica en la naturaleza.

En 1963, George R. Landolt, que había trabajado conmigo unos años, y Robert J. Argauer (también de Mobil) decidieron comprobar si podían incrementar aún más la relación silicio-aluminio para producir zeolitas muy ricas en silicio. Lo lograron, cuando substituyeron en la mezcla de reacción un ion amónico cuaternario, que es tres veces mayor que el TMA. Así se inventó la zeolita ZSM-5. El ion elegido, tetra-*n*-propilamonio (TPA), funcionaba con precisión merced a su gran tamaño. Sólo un limitado número de grandes cationes cabe dentro del armazón de la zeolita; debido a que las cargas han de estar compensadas, esta condición limita extraordinariamente el número de iones de aluminio asociados que pueden estar presentes, y el resultado es una estructura rica en silicio.

Transcurridos algunos años, Francis G. Dwyer y Edwin E. Jenkins, de Mobil, llegaron aún más lejos, al preparar variedades de ZSM-5 que contenían cantidades despreciables de aluminio. Así, se vio que el armazón de algunas de las muestras analizadas eran sílice en más del 99,99 por ciento. Se han seleccionado algunos de estos cristales hidrofóbicos para eliminar los hidrocarburos contaminantes del agua.

La parquedad en átomos de aluminio y cationes de las zeolitas ZSM-5 podría inducir a pensar que ello impide su actividad como catalizadores efectivos. Así, David H. Olson, Rudolph M. Lago y Werner O. Haag, de Mobil, han demostrado que, en la forma hidrogenada de ZSM-5 (que es análoga a la forma hidrogenada de Linde Y, según vimos), la actividad catalítica disminuye en proporción directa a la disminución de la cantidad de aluminio (en peso) presente en el cristal. Presumiblemente, la actividad catalítica y el contenido en aluminio guardan relación, ya que el número de átomos de aluminio regula el número de centros protónicos, o iones hidrógeno.



4. VPI-5, un nuevo cristal sintético. De estructura similar a las zeolitas, posee, sin embargo, en su armazón poco silicio. Consta, principalmente, de fósforo, aluminio y oxígeno. Sólo los átomos de oxígeno (*esferas rojas*) se aprecian con nitidez en este modelo. Los canales del VPI-5 miden entre 12 y 13 angstrom (diezmillonésimas de milímetro) de diámetro, mayores que los de cualquier zeolita sintética o natural conocida. Con este tamaño, los canales pueden alojar grandes hidrocarburos, lo que sugiere que ciertas formas catalíticas VPI-5 podrían resultar valiosas, en el futuro, para la rotura de fracciones de petróleo más pesadas que el gasóleo; se superó el éxito obtenido con Linde Y. Mark E. Davis, adscrito al Instituto Politécnico y Universidad estatal de Virginia, cuyo grupo de investigación creó el VPI-5, ha realizado la imagen.

No obstante, Olson, Lago, Haag, el autor y otros investigadores de Mobil –Richard J. Mikovsky, Stuart D. Hellring, Kirk D. Schmitt– han demostrado que las zeolitas ZSM-5 sí se transforman en catalizadores superactivos. En concreto, hemos comprobado que, exponiendo la forma hidrogenada de ZSM-5 a un ligero tratamiento con vapor, podemos generar nuevos centros catalíticos que son de 45 a 75 veces más activos que los centros protónicos normales.

Dichas zeolitas tratadas con vapor no se utilizan para la descomposición catalítica del gasóleo, ya que sus canales elípticos, demasiado pequeños, no sirven para alojar los grandes hidrocarburos del mismo; las cuerdas de sus ejes mayor y menor miden sólo 5,4 y 5,6 angstrom. Sin embargo, el tamaño es perfecto para la catálisis de ciertos hidrocarburos cíclicos menores. En este sentido, el tolueno, un subproducto del refinamiento convencional del petróleo, puede mejorarse con ZSM-5, que lo transforma en dos hidrocarburos relacionados, pero más valiosos, como el benceno y el para-xileno. El benceno es un disolvente ubicuo que se encuentra en pinturas, barnices y agentes limpiadores; el para-xileno se convierte en ácido tereftálico, que se utiliza, a su vez, en la producción de diversos materiales sintéticos.

La síntesis de grandes cantidades de para-xileno puro se lleva a cabo debido a una habilidad de las zeolitas cada vez más importante, inicialmente postulada por Vincent J. Frilette y Paul

B. Weisz, de Mobil, en 1961: la catálisis morfoselectiva. En este proceso, los productos de la catálisis se controlan, en parte, por el tamaño o por la forma de los canales de las zeolitas. Las moléculas de tolueno, cuyas menguadas proporciones les facilitan la penetración en los canales de la ZSM-5, atraviesan un lecho de zeolitas a la vez que se calientan a unos 520 grados centígrados. A esta temperatura, las zeolitas inducen cambios en el tolueno, produciendo benceno y las tres formas diferentes del xileno (dimetilbenceno).

Benceno y para-xileno escapan rápidamente de los cristales, pero los otros dos xilenos (orto- y meta-), que tienen formas distintas de las de su pariente, hallan dificultad en seguir su camino por los canales. Mientras están "clavadas", se convertirán posiblemente en la forma para-, después de lo cual escaparán. Así, ZSM-5 asegura de forma selectiva que la mayoría de las moléculas de xileno que se difundan hacia fuera sean de la forma para-.

¿Cómo cataliza ZSM-5 la conversión morfoselectiva de metanol en gasolina? Este proceso reviste especial interés para Nueva Zelanda, por ejemplo, y cuantos países carecen de yacimientos petrolíferos pero cuenten con un abundante suministro de metano (CH_4), o gas natural, que puede convertirse fácilmente en metanol (CH_3OH). Después de que el metanol se descompone parcialmente en un compuesto llamado dimetiléter y en agua, el éter se pasa por un catalizador de zeolitas, donde se convierte en agua y en una compleja mezcla de hidrocarburos. Como sucede en la producción de para-xileno, las moléculas mayores que las de la gasolina quedan atrapadas en los canales cristalinos, difundiéndose tan sólo cuando el proceso catalítico rinde moléculas suficientemente pequeñas.

Algunas de las zeolitas más interesantes desarrolladas desde que ZSM-5 estuvo disponible, no lo son en el estricto sentido de la palabra; se requiere, en general, que el armazón cristalino conste, de modo exclusivo, de silicio, aluminio y oxígeno. Los nuevos materiales, todavía curiosidades de laboratorio, se fundan en el fósforo más que en el silicio. Sin embargo, algunos investigadores los consideran zeolitas, porque tienen canales intracristalinos uniformes que son muy similares, y en algunos casos idénticos, a los de éstas. Hay nuevos materiales que poseen, también, estructuras clásicas de zeolita y propiedades adsorbentes.

El futuro prometedor de estos materiales –como el de cuantos se alteran para estar más cercanos a la química de las verdaderas zeolitas– se debe a que algunos ofrecen estructuras originales que nos pueden permitir aplicarlos como catalizadores, tamices moleculares, adsorbentes o intercambiadores iónicos en situaciones donde ninguna zeolita ha demostrado todavía su utilidad.

En ese contexto, Mark E. Davis y sus compañeros, del Instituto Politécnico y de la Universidad de Virginia, han sintetizado un cristal de fosfato de aluminio parecido a las zeolitas, VPI-5, cuyos canales son mayores que cualquiera de los encontrados en las zeolitas naturales o sintéticas: unos 12 o 13 angstrom de diámetro. Su gran tamaño aumenta la posibilidad de que alguna versión del cristal llegue a usarse, algún día, como catalizador para descomponer hidrocarburos mayores que los que puede manejar Linde Y; en el futuro, los fabricantes podrán extraer más gasolina de sus recursos petrolíferos.

¿Qué nos depara el futuro? Además de las sorpresas que todavía nos proporcionarán las "zeolitas" de fosfato de aluminio y sus derivados, sospecho que pueden aparecer nuevas e importantes estructuras, fruto de otras estrategias experimentales. Estoy pensando, por ejemplo, en la reciente preparación, por parte de los investigadores, de zeolitas a partir de disolventes orgánicos no acuosos, en vez de las disoluciones acuosas inorgánicas normales.

Se necesita, empero, acotar qué permitirá a los químicos predecir las estructuras y otras propiedades que surgirán cuando varios ingredientes se mezclen juntos en relaciones específicas, a presiones y temperaturas determinadas. Hasta ese momento, el método de prueba y error predominará. Por fortuna para todos, ese método ha sido, hasta ahora, bastante útil para la industria.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

ZEOLITE MOLECULAR SIEVES: STRUCTURE, CHEMISTRY AND USE. Donald W. Breck, John Wiley & Sons, Inc., 1974.

ZEOLITE CHEMISTRY AND CATALYSIS. Jule A. Rabo. ACS Monograph 171, American Chemical Society, 1976.

HYDROTHERMAL CHEMISTRY OF ZEOLITES. R. M. Barrer. Academic Press, 1982.

THE ZEOLITE CAGE STRUCTURE. J. M. Newsam en *Science*, vol. 231. n.º 4742, págs. 1093-1099; 7 de marzo de 1986.

Taller y laboratorio

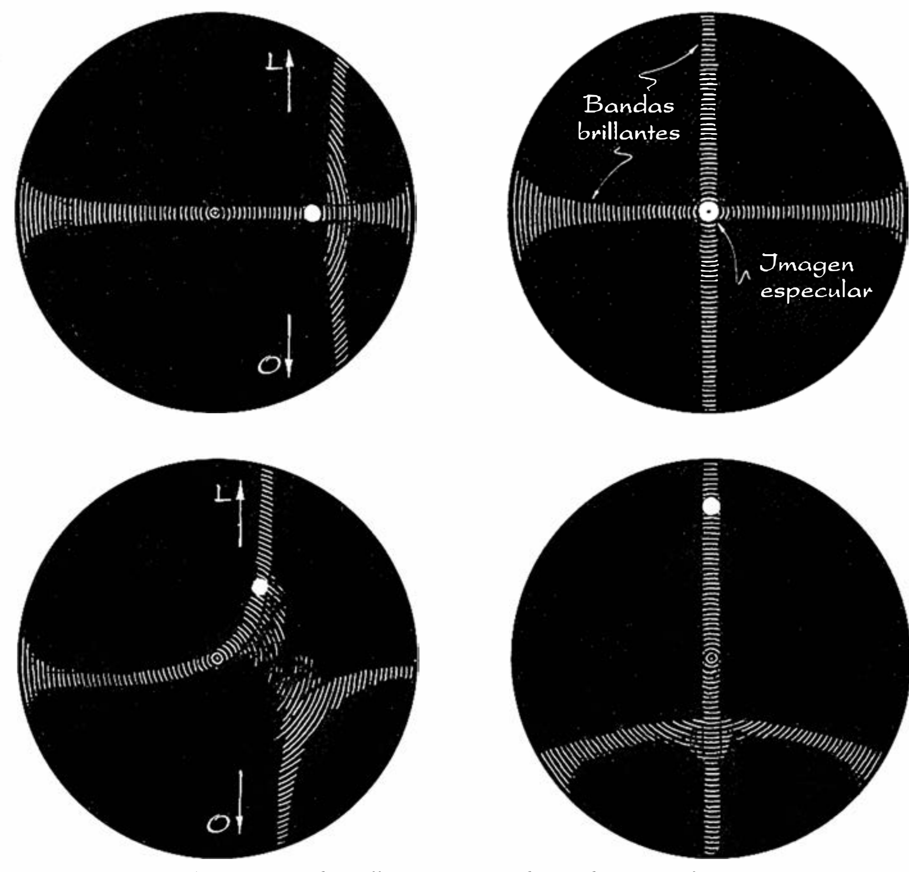
¿Qué pueden tener en común un disco y una escobilla de limpiaparabrisas?

Jearl Walker

Póngase sobre una mesa un disco de gramófono y una lámpara. Esta ha de iluminar el disco desde el lado opuesto a nosotros. Nos hallaremos, además, en una habitación en la que no entre otra luz. Con el centro del disco más o menos equidistante de nosotros y la lámpara, mirémosle con un ojo cerrado y desde la misma altura que la bombilla. El disco se halla iluminado por completo. Pero, ¿se ve brillar toda su superficie? ¿O aparece sólo un punto luminoso, como el que veríamos en un espejo?

Ni una cosa ni la otra. Apreciaremos una suerte de bandas brillantes y estrechas que dibujan una cruz. El resto del disco aparecerá pálidamente iluminado (si no fuera por la luz que se difunde en las paredes y objetos de la habitación, quedaría a oscuras). Un brazo de la cruz corre por la línea que va de nosotros a la lámpara y el otro brazo cruza el anterior en ángulo recto [*véase el dibujo superior derecho de la figura 1*]. En la figura se supone que el centro del disco carece de la etiqueta habitual y que se halla también cubierto de surcos, lo mismo que el resto. Si tal fuera el caso en la realidad, veríamos en el centro una mancha más brillante.

Si desplazamos el disco hacia la izquierda, la banda brillante que se extiende entre nosotros y la lámpara empezará a curvarse levemente, pero la otra banda permanecerá recta y seguirá cruzando horizontalmente el centro del disco, tal como se muestra en el dibujo superior izquierdo. Con tal que no hayamos movido demasiado el disco, el punto más brillante permanecerá en la banda recta, cerca de la otra banda. Un extremo de ésta apunta hacia la lámpara (rotulado *L* en la figura) y el otro extremo (rotulado *O*, "observador") apunta hacia nosotros. Si ahora nos acercáramos al disco desde su posición centrada original, la banda que se curvaría un poco sería la que va de izquierda a derecha, mientras que la otra quedaría recta, como en el dibujo inferior derecho. La mancha más brillante se encontraría en este caso en el lado del disco opuesto a nosotros.



1. Figuras de reflexión en un disco de gramófono

Cuando movemos el disco hacia la izquierda y hacia nosotros, a la vez, las bandas se separan en unas figuras que semejan hipérbolas; se ilustra en el dibujo inferior izquierdo. Una banda sigue pasando por el centro del disco; si éste no se ha movido demasiado, la mancha brillante seguirá en esa banda. La segunda banda caerá cerca del borde del disco, originándose en un punto del borde, desde donde se dirige al centro para virar luego hacia otro punto del borde. Ahora, un extremo de la primera banda apunta a la lámpara y un extremo de la segunda banda señala hacia nosotros. Si el disco lo desplazamos más, la segunda banda se comprime contra el borde y termina por desaparecer.

La anchura de las bandas depende del tamaño de la bombilla y de la proximidad de la lámpara. Una bombilla grande, con la lámpara cerca, crea bandas anchas y bastante borrosas. La visibilidad de las figuras puede mejorarse tapando la boca de la lámpara con una hoja de papel de aluminio en el que se haya practicado un pequeño orificio. De ese modo, las bandas se tornarán estrechas y nítidas. (Cuidado con que la lámpara se recaliente.)

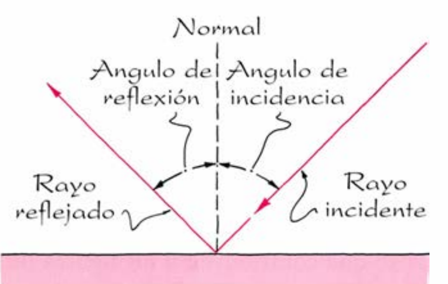
¿A qué se deben estas figuras? La explicación se encuentra en un impresionante estudio realizado en 1963 por J. B. Lott, quien por entonces acababa de graduarse en la Felsted School, de

Essex (Inglaterra). Parecía claro, desde luego, que las figuras obedecían a reflexiones en los surcos del disco; el problema residía en determinar qué partes de qué surcos poseían la orientación adecuada para reflejar la luz hacia un observador. La solución propuesta por Lott consiste en imaginar que la lámpara y el observador se hallan dentro de un elipsoide, que es una forma geométrica tridimensional similar a un dirigible y que se genera al girar una elipse en torno a uno de sus ejes. Allá donde coincida una porción de surco con el costado de un elipsoide, la luz se reflejará hacia el observador. He descubierto que el estudio de Lott explica también una observación más corriente: la estela o rastro luminoso que parecen producir las farolas cuando viajamos de noche con el limpiaparabrisas del coche funcionando para limpiar el cristal de lluvia o nieve.

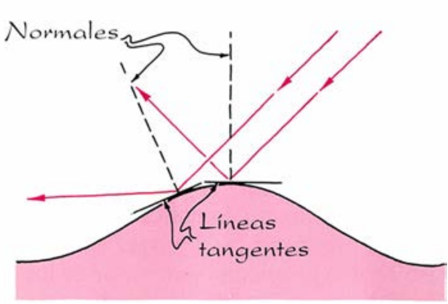
Para seguir el análisis de Lott, debemos empezar por entender la reflexión de la luz en una superficie plana. Supongamos que el disco carezca de surcos. Supongamos, asimismo, que la bombilla de la lámpara sea muy pequeña y podamos considerarla puntual. La luz procedente de la lámpara se esparce sobre el disco y se refleja en su superficie. Cada recta perpendicular a la superficie en un punto de reflexión recibe el nombre de normal; la inclinación del rayo procedente de la lámpara se mide por el ángulo que forma con la normal [*véase la figura 2*]. Ese rayo se llama rayo incidente y el ángulo citado es el ángulo de incidencia. El rayo que sale de la superficie constituye el rayo reflejado; llámase ángulo de reflexión el que forma con la normal.

La reflexión obedece dos reglas sencillas: la normal, el rayo reflejado y el rayo incidente se encuentran en un mismo plano; los ángulos de incidencia y de reflexión son iguales. Si el centro de un disco liso equidista de la lámpara y el observador, éste interceptará un rayo reflejado en el centro. Todos los demás rayos se reflejan también en la superficie del disco, pero no en dirección al ojo del observador. De este modo, lo que se ve es un punto luminoso en el centro del disco, como si fuera ese punto, y no la lámpara, la fuente luminosa.

A ese punto lo llamaré "imagen especular" de la lámpara, ya que el disco lo genera actuando como un espejo. Cuando el ojo del observador se encuentre a la misma altura que la lámpara, la imagen especular equidistará siempre de ambos. Una manera de demarcar su posición consiste en desplazar el disco sobre la mesa, o bien (lo que es lo mismo) cambiando nuestra posición. Por ejemplo, si desplazamos el disco hacia la izquierda y hacia nosotros, la imagen especular aparecerá en el cuadrante superior derecho del disco. (La imagen especular es, por supuesto, el punto brillante que, tal como mencioné antes, se ve en la figura de reflexiones en un disco con surcos.)



2. Reflexión en una superficie plana

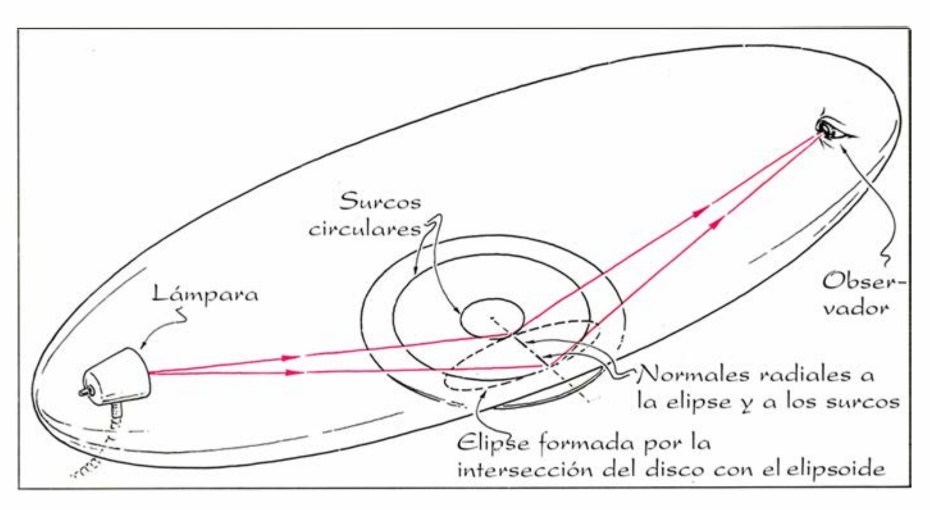


3. Reflexiones en una superficie curva

Las reglas de la reflexión resultan también válidas para una superficie suavemente curvada, aunque, en este caso, la normal cae perpendicular a una recta tangente a la superficie en el punto de reflexión, según nos ilustra la figura 3. Lott se basó en la hipótesis de que los surcos de un disco constituyen un sucesión de lomas y valles no muy pronunciados, dispuestos en círculos en torno al centro del disco. Si tomamos una sección transversal de una loma siguiendo el radio, y trazamos normales en los puntos de las laderas, la loma quedará erizada de normales; algo así como las púas de un puercoespín enfurecido. En la cima de la loma, la normal será vertical y las demás normales se hallarán inclinadas radialmente con respecto a la vertical, bien hacia el centro del disco o bien hacia fuera.

La reflexión de la luz hacia el observador en los surcos puede describirse con ayuda de las normales. Para que al ojo del observador llegue un rayo, la normal en el punto de reflexión debe tener determinada inclinación. Aduce Lott que esta condición la cumplen sin problemas todos los surcos. Elijamos un punto cualquiera de la circunferencia que forma el surco y consideremos a continuación las normales a las laderas de la loma correspondiente según la sección transversal. Habrá, por lo menos, una normal que posea la inclinación adecuada para que la luz que se refleje en su extremo sea enviada a la altura del ojo. Así, pues, la condición de que un rayo llegue hasta cierta altura no es responsable de las figuras que se aprecian en el disco.

Según razonaba Lott, hay que buscar la causa en otra condición más restrictiva: el rayo reflejado debe estar dirigido debidamente, por la derecha o la izquierda, hacia el ojo. Esta condición la cumplen sólo determinados lugares de ciertos surcos. El razonamiento simplifica bastante el estudio, puesto que revela que lo único que importa es la orientación horizontal de las normales a los círculos formados por los surcos. El estudio se torna más sencillo si, ho-



4. Reflexión de la luz en una sección elíptica de un elipsoide

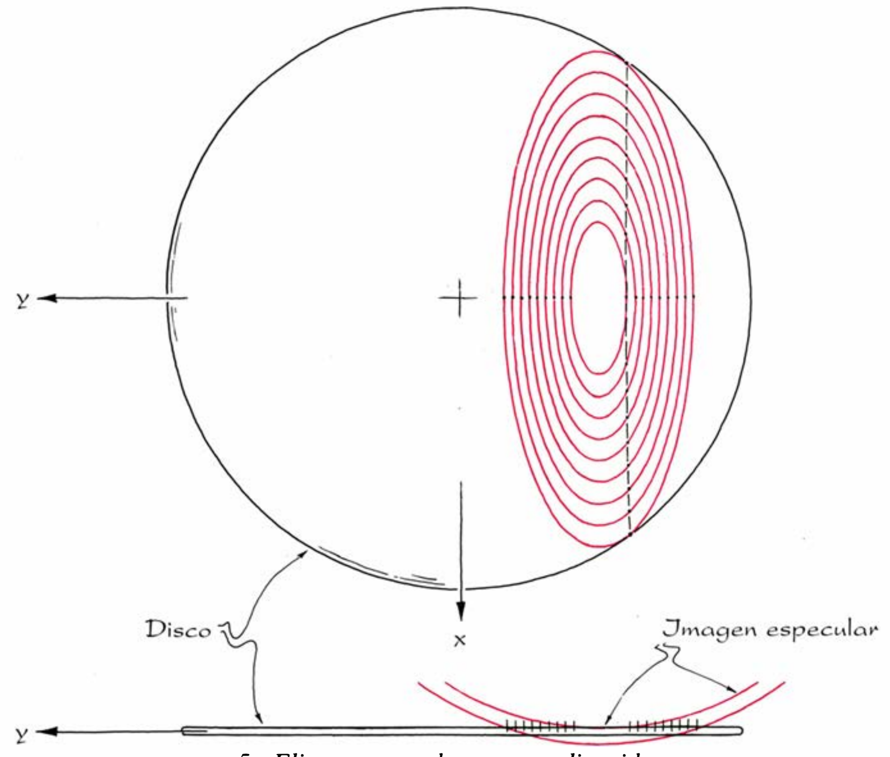
rizontalmente, las normales son radiales: sus prolongaciones pasan por el centro del disco. En lo que sigue, omitiré la componente vertical de las normales y me referiré exclusivamente a su componente radial.

Para averiguar qué segmentos de qué círculos producen las figuras, Lott se basó en una propiedad particular de los elipsoides. Según esta propiedad, un rayo de luz que se origine en uno de los dos focos de un elipsoide y se refleje en su interior, debe pasar por el otro foco. Lott intuyó que, cuando un observador recibe una reflexión procedente de un disco iluminado por una lámpara, es como si ésta se encontrara en uno de los focos de un elipsoide y el observador en el otro foco. El disco secciona horizontalmente la parte inferior del elipsoide, delimitando la intersección entre ambas superficies una elipse [*véase la figura 4*].

Para que la luz se refleje en el elipsoide, aquélla debe reflejarse en uno de los puntos que forman la elipse. Como también debe reflejarse en el círculo de un surco, ese círculo y la elipse han de coincidir en el punto de la reflexión. Lo que implica, a su vez, que el círculo y la elipse compartan la misma normal en ese lugar. Como la normal en cualquier punto de un disco es radial y pasa por el centro, el punto de la elipse donde se refleja la luz hacia un observador será un punto de normal radial.

Para explicar la figura de reflexiones entera que se crea en un disco, hay que considerar una familia de elipsoides de diferentes tamaños. La sección que el disco corta en algunos de los elipsoides produce elipses grandes, mientras que en otros genera elipses pequeñas. Pero en cualquier caso los puntos de cada elipse que contribuyen a las figuras de reflexión son puntos de normales radiales. Estas condiciones le bastaron a Lott para resolver las ecuaciones de las elipses, los círculos y las normales radiales y determinar, así, los puntos de un disco que reflejan la luz hacia el ojo de un observador. Se limitó a considerar el caso en que la lámpara y el ojo yacen a la misma altura sobre un disco horizontal. La combinación de los puntos de reflexión forman las bandas que se ven en los discos.

He descubierto que es posible predecir sin necesidad de cálculos la forma general de las bandas recurriendo a una serie de gráficas. En la figura 5 se muestra un ejemplo en el cual el disco ha sido desplazado, desde su posición centrada inicial, directamente hacia la izquierda del observador. En dicha figura, la ilustración superior representa una vista en planta de las elipses que intersecan los elipsoides en el plano del disco. El eje y va de izquierda a derecha del observador, y el eje x es perpendicular al y. La ilustración inferior dibuja una sección transversal vertical efectuada según el eje y. En ésta se incluyen las porciones inferiores de las secciones transversales cortadas en dos de los elipsoides.



5. Elipses generadas por un elipsoide

Para construir el esquema en planta, se comienza por la imagen especular, que es el punto brillante que aparece en las figuras de reflexión. Teniendo presente que, cuando el ojo del observador y la lámpara están a la misma altura, la imagen especular equidista de ambos, el eje y debe estar consecuentemente desplazado hacia la derecha del centro del disco. Por otra parte, la imagen especular está asociada a un elipsoide que roza levemente la superficie superior del disco, por lo que aquí la elipse queda reducida a un punto en el plano del disco. En la ilustración inferior de la figura 5 se muestra una porción de ese elipsoide. Trácese ese punto en un esquema en planta.

Alrededor de ese punto dibújese una pequeña elipse centrada en él y con su eje mayor paralelo al eje x. Esa elipse está asociada a un elipsoide de mayor tamaño que el primer elipsoide y que atraviesa el disco; este elipsoide y su elipse tienen la misma orientación. Consideremos ahora las normales a los puntos de la elipse. (Téngase presente el hecho de que cada normal es perpendicular a una tangente a la elipse.) Márquense los puntos cuya normal sea radial, es decir, que pase por el centro del disco. Estos puntos son cuatro: dos en el eje y (uno a cada lado de la imagen especular) y dos en los extremos más puntiagudos de la elipse.

Repítase ahora la misma operación con elipses similares pero progresivamente mayores, producidas por elipsoides cada vez más grandes. Cada una de esas elipses tiene cuatro puntos de normal radial. Tras haber localizado unos cuantos de esos puntos, enlácense con líneas; éstas reproducen las bandas brillantes de una figura de reflexión. Si inclinamos el disco, o lo doblamos un poco, se hace más difícil explicar las reflexiones, pero las formas de las bandas son similares.

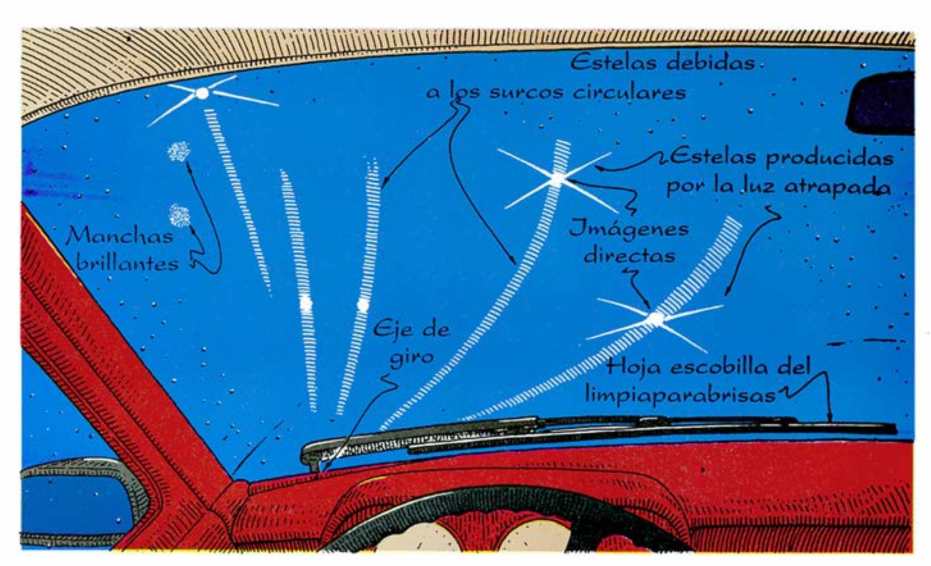
Cuando cayó en mis manos el artículo de Lott y observé las figuras de reflexión en un disco, tuve la sensación repentina de que una de las figuras la había visto ya en otro sitio. Me di cuenta entonces de que siempre que conduzco por la noche con lluvia o nieve, si miro una farola o los faros de otro vehículo que venga de frente a través de una zona del cristal barrida por el limpiaparabrisas, aparece una especie de estela o reguero luminoso que corre de un lado a otro del farol o de los faros [*figura 6*]. ¿Podríamos relacionar esta

estela con una de las bandas brillantes que se forman en los discos?

Paul Kirkpatrick, de la Universidad de Stanford, ya publicó en 1954 una nota breve acerca de esas estelas luminosas en los parabrisas. Las atribuyó al hecho siguiente: cuando la hoja de goma de una escobilla barre el vidrio, va abriendo surcos en los detritos pegajosos que siempre tienden a adherirse al cristal. Como la escobilla barre un arco, los surcos forman círculos centrados en el eje de giro de aquélla; tales surcos pueden persistir mucho tiempo después de que el parabrisas se haya secado.

Cuando miramos una lámpara a través del conjunto de círculos, interceptamos la luz que se refleja en los costados de los surcos. Durante el día, esa luz, demasiado tenue, se nos escapa; pero, por la noche, puede resultar tan perceptible que llegue a ser molesta. La estela es a menudo recta, con uno de sus extremos apuntando hacia el eje del limpiaparabrisas. Cuando cambiamos de ángulo de visión con respecto a la fuente luminosa, la imagen directa de la lámpara (farol o faro) se desliza por el parabrisas y la estela gira en torno a la imagen de tal modo que el extremo sigue apuntando al eje de giro. Menciona Kirkpatrick que, a veces, la estela es notablemente curva, aunque su extremo inferior sigue apuntando al pivote. Espoleado por las observaciones de Kirkpatrick, me pregunté si la estela podría relacionarse con una de las bandas brillantes de los discos: en concreto con aquella en la que se ve la imagen especular.

Tras reflexionar un poco, caí en la cuenta de que las situaciones son casi iguales. La figura que vemos en un parabrisas es esencialmente la que vemos en el lado opuesto de un disco cuando lo movemos hacia nosotros y desplazamos así la imagen especular hacia el lado opuesto, como en cualquiera de las ilustraciones inferiores de la figura 1. En ambos casos hay una línea brillante que pasa por el centro del disco, o al menos que apunta al centro del disco, pudiendo esa línea ser recta o curva según las circunstancias. En algún lugar de la línea hay un punto más brillante. En el disco, el punto brillante es una imagen especular y la fuente luminosa está en el mismo lado que el observador. En el parabrisas, la mancha brillante es una imagen directa y la fuente luminosa se encuentra al otro lado de los círculos. Concluí así que el estudio de Lott era aplicable a las estelas de los parabrisas.



6. Estelas y manchas luminosas en un parabrisas húmedo

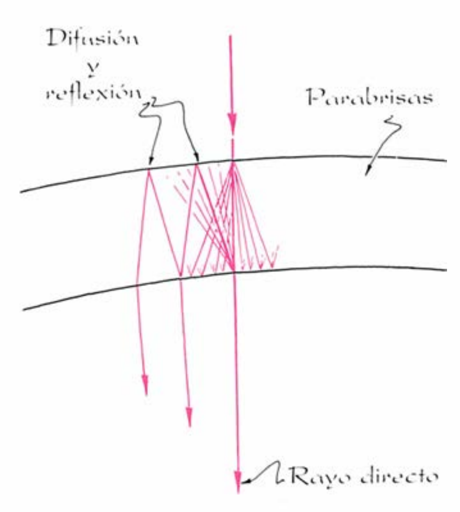
Pero aún quedaba un detalle en el alero. En el parabrisas, la falta del “cuadrante próximo” (correspondiente a la parte del disco próxima al observador) eliminaba al parecer la segunda banda o estela luminosa; una segunda estela (que discurriría de izquierda a derecha, o bien estaría fuertemente curvada y separada de la primera) se hallaría, cabía presumirlo, por debajo del eje del limpiaparabrisas. ¿No habría manera de contemplar esta segunda banda? Lo intente y fracasé varias veces. Después, un día, viendo el sol poniente a través de la porción curva del parabrisas del lado del acompañante, vi las dos estelas junto al sol; presentaban un aspecto similar al dibujo inferior izquierdo de la figura 1. (Si alguien trata de buscar estas dos estelas del sol, que procure no mirar directamente al astro durante más de un segundo, pues el peligro para la vista es obvio.) Descubrí entonces que, cambiando de perspectiva, podía hacer que se juntaran o separaran a voluntad (y en esas maniobras casi me salgo de la carretera). Todavía no sé exactamente por qué apareció aquella segunda estela.

Durante el invierno pasado, para observar mejor las estelas, dejé que se fuera acumulando en el parabrisas la sal que se lanza para limpiar de nieve y hielo las carreteras. De este modo los surcos que abrían las escobillas eran completamente visibles. Las estelas que producen quizá se debieran más a un complicado proceso de difusión de la luz que a unas simples reflexiones como las imaginadas por Kirkpatrick, pero los resultados eran similares. Alguna vez advertí una nueva y curiosa característica de las estelas y es que, cuando viajaba en dirección al sol poniente, las ramas desnudas de los árboles obstaculizaban parte de la imagen del sol dando lugar a líneas oscuras a través de la estela correspondiente.

De noche, cuando se nos acerca un automóvil, la prolongación de las estelas de sus faros hacia el eje de nuestro limpiaparabrisas provoca la convergencia de las mismas. Como los círculos más cercanos al pivote son mucho más curvos que los más alejados, ocurre además que las estelas se estrechan a medida que se acercan al eje.

Mencionaba Kirkpatrick una ilusión de profundidad que puede percibirse en la estela creada por un farol. En virtud de la separación de nuestros ojos, cada uno de éstos ve su propia estela. La separación entre éstas es máxima junto al pivote y, mínima, en la imagen directa del farol. El observador puede percibir ambas estelas; ahora bien, si su cerebro logra fundirlas y combinarlas, la separación entre ellas creará la ilusión de profundidad y al observador le parecerá hallarse ante un camino iluminado que lo une al farol. Si las estelas son levemente curvas, el camino será también curvo, cual si atravesara un valle invisible y luego trepara por una ladera hacia el farol. (Una profundidad similar puede apreciarse a veces en la figura de reflexión de un disco.)

La mayoría de los parabrisas son curvos, especialmente en los costados. Esta curvatura altera la forma de las estelas, igual que al doblar un disco cambiamos la figura de reflexión. Además, la curvatura hace que algunas zonas del material adherido difunda alguna luz hacia el observador, luz que no le llegaría si el vidrio fuera plano. Asimismo, atrapa momentáneamente parte



7. Retención momentánea de la luz

de la luz procedente del farol, tal como se representa en la figura 7, antes de enviarla al observador. Durante esa retención, la luz se refleja y difunde muchas veces dentro del vidrio, separándose de la imagen directa de la lámpara. De ese modo, lo que se ve es una estela brillante que se extiende partiendo de la imagen directa. Si alargamos la mano hacia el vidrio por fuera de la ventanilla y tapamos la imagen con un dedo, la estela desaparece. Unas gafas graduadas producen unas estelas similares, pero dentro de un automóvil estas últimas pueden distinguirse de las causadas por el parabrisas, pues inclinando la cabeza las estelas producidas por las gafas giran.

Y ahora unas cuantas preguntas más acerca de las reflexiones en círculos concéntricos. Si desplazamos bastante un disco, bajo la luz de una lámpara de mesa, ¿por qué el extremo de la banda brillante que pasa por el centro evoluciona palideciendo primero y luego desapareciendo? (Sugerencia: recordando la hipótesis de Lott según la cual en un surco hay siempre una normal que manda un rayo hasta la altura del ojo, considérese cuál puede ser la inclinación de una normal en la unión de una loma y un valle.) ¿Qué clase de reflexiones se ven en un "disco de láser"? ¿Por qué aparecen colores en las reflexiones tanto en un disco convencional como en un disco de láser cuando la luz de la lámpara es blanca?

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

A BINOCULAR ILLUSION. Paul Kirkpatrick en *American Journal of Physics*, vol. 22, n.º 7, pág. 493; octubre, 1954.

REFLECTIONS ON A GRAMOPHONE RECORD. J. B. Lott en *Mathematical Gazette*, vol. 47, n.º 360, págs. 113-118; mayo, 1963.

Juegos de ordenador

Capturas del día: biomorfos sobre teselas, con guarnición de palomitas y caracoles

A. K. Dewdney

"A veces me considero un pescador. Mis ideas y programas son mis anzuelos, mis cañas y carretes. Las imágenes que el ordenador me sirve, mis trofeos y manjares más deliciosos."

–Clifford A. Pickover.
Computers, Pattern, Chaos and Beauty.

Han sido varias las ocasiones en que he sentido una imperiosa tentación de mencionar aquí una o varias de las extrañas y hermosas concocciones gráficas de Clifford A. Pickover, un renombrado investigador del centro de investigación Thomas J. Watson, que la corporación IBM tiene en Yorktown Heights, Nueva York. Amén de sus investigaciones de índole más seria, Pickover tiene toda una caja llena de programas –sus "aparejos de pesca"–, que generan configuraciones caóticas, aunque de extraña estética. Incapaz de resistir por más tiempo las deliciosas capturas de Pickover, he decidido describir en este artículo la forma en que los lectores pueden pescar con caña tres recreaciones suyas tan sencillas como gratas al paladar: biomorfos, teselaciones de Truchet y palomitas fractales. Los lectores podrán degustar también los caracoles logarítmicos tridimensionales capturados por este hombre, a un tiempo sobrio y lleno de sentimiento.

¿Qué es un biomorfo? El término no es nuevo en esta sección. En abril de 1988, describí ya las formas cuasi-biológicas creadas por un programa preparado por Richard Dawkins, biólogo de la Universidad de Oxford. A partir de una colección de perfiles de formas dendríticas, un operador humano selecciona una; arrancando de ésta, el programa desarrolla otra colección de figuras, todas ellas con alguna variante respecto de la seleccionada. El operador va eligiendo de igual manera figura tras figura. Al cabo pueden hacer aparición perfiles bastante extraños, pero manifiestamente orgánicos.

Aunque Pickover desarrolló sus biomorfos de manera independiente y casi simultánea, el método con que se generan y presentan es del todo distinto. A diferencia de los biomorfos de Dawkins, los de Pickover tienen aspecto manifiestamente microbiano, lo que ha inducido a la revista *Omni* a caracterizar a Pickover como "homólogo de von Leeuwenhoek en el siglo xx" (Anton van Leeuwenhoek, un pañero y pulidor de lentes holandés, fue uno de los primeros microscopistas).

Los biomorfos de Pickover habitan en el plano complejo, sede del afamado conjunto de Mandelbrot (descubierto por Benoit B. Mandelbrot, colega de Pickover en el centro de investigación de IBM). Los biomorfos son producidos por una versión abreviada del proceso que traza la delicada geometría fractal de los conjuntos de Julia, parientes cercanos del conjunto de Mandelbrot, que también fueron descritos aquí en enero de 1988. Cada biomorfo se genera mediante iteraciones múltiples, repeticiones de una función particular, o sea, de una secuencia de operaciones matemáticas. Cada iteración utiliza la salida de la precedente tanda de operaciones como valor de entrada de la siguiente iteración.

Por ejemplo, el biomorfo radiolario de 12 agujas de la parte inferior izquierda de la extravagante vista microscópica de la figura 1 fue generado por iteración de la función:

$$z_{n+1} \longleftarrow z_n^3 + c$$

Se empieza "sembrando" como valor inicial un número complejo z_0, que se eleva al cubo y a cuya potencia se le suma un número complejo fijo, c. Las mismas operaciones aritméticas se efectúan seguidamente sobre la suma resultante, z_1, lo que produce z_2, y así sucesivamente.

Un número complejo consta de dos números de tipo ordinario, llamados parte real y parte imaginaria. Lo mejor es considerar que estos dos números son las coordenadas cartesianas de un punto de un plano. Es tradicional expresar los números complejos como suma de sus partes, real e imaginaria. El número complejo $3 + 5i$, pongamos por caso, tiene parte real 3 y parte imaginaria igual a 5. (La unidad imaginaria i actúa a modo de marca, para recordar a los matemáticos qué papel desempeña cada parte.) Con el fin de evitar más digresiones, en el recuadro de la figura 5 explico de qué forma se suman, se multiplican y se elevan al cubo números complejos.

Para generar un biomorfo, es necesario disponer primero una parrilla de puntos sobre un rectángulo del plano complejo. Las coordenadas de cada punto constituyen las partes real e imaginaria de un valor inicial, z_0, para el proceso iterativo hace poco esbozado. A cada punto se le asocia también un elemento de imagen, un píxel, en la pantalla del ordenador. Según el resultado de una sencilla comprobación efectuada sobre el "tamaño" de las partes real e imaginaria del valor final de z, el píxel se colorea de negro o de blanco.

Todos los biomorfos mostrados en la figura 1 se hallaron en un cuadrado de 20 por 20 centrado en el origen del plano complejo. ¿Cuántos otros lograrán encontrar los intrépidos lectores? Les facilitaré el necesario aparato de visión: un programa al que llamo BIOMORFO, y que se inspira en el algoritmo básico de Pickover. La versión que expongo a continuación genera el radiolario.

```
c ⟵ 0,5 + 0,0i
para j ⟵ 1 hasta 100
  para k ⟵ 1 hasta 100
     calcular z0
     z ⟵ z0
     para n ⟵ 1 hasta 10
     z ⟵ z³ + c
         si |real(z)| o |imag(z)|
         o z > 10
               entonces salir del bucle
     si |real(z)| o |imag(z)| < 10
        entonces dibujar (j,k) en negro
        si no, dibujar (j,k) en blanco
```

La instrucción "computar z_0", aunque de sencilla apariencia, no es en realidad tan trivial. Exige la conversión de cada par (j,k) de coordenadas de píxel en un número complejo. Ello se efectúa dividiendo respectivamente la longitud y la anchura de una porción del plano complejo por el número de valores de j y de k. Estos cocientes sirven entonces como incrementos en los cuales son sistemáticamente aumentadas las partes real e imaginaria de z_0 en cada uno de los ciclos del algoritmo.

Por ejemplo, el radiolario se encuentra en realidad en una "ventana" cuadrada del plano complejo, delineada por los siguientes cotas para las partes real e imaginaria de z_0.

$$-1{,}5 < \mathrm{real}(z_0) < 1{,}5$$
$$-1{,}5 < \mathrm{imag}(z_0) < 1{,}5$$

Dado que lo mismo j que k recorren los valores enteros de 1 a 100, tanto la parte real como la imaginaria son sistemáticamente incrementadas en pasos de 0,03. Por consiguiente, la versión de BIOMORFO antes presentada ha de basarse en sentencias del tipo

$$\mathrm{real}(z_0) \longleftarrow -1{,}5 + 0{,}03j$$
$$\mathrm{imag}\ (z_0) \longleftarrow -1{,}5 + 0{,}03k$$

con el fin de computar 10.000 valores de z_0, cada uno de los cuales se itera y ensaya.

Dentro del bucle más interno de 10 iteraciones, se supervisa continuamente el "tamaño" de z (denotado $|z|$), al que los matemáticos llaman "módulo" o "valor absoluto", así como el tamaño de las partes real e imaginaria ($|\mathrm{real}(z)|$ e $|\mathrm{imag}(z)|$). El tamaño o módulo de un número complejo es sencillamente la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de las partes real e imaginaria del número; el tamaño de sus partes componentes está dado por sus respectivos valores absolutos. (El valor absoluto de un número es el valor numérico positivo resultante de despreciar el signo.)

Si el tamaño de z o de sus partes componentes excede de 10, el programa habrá de salir inmediatamente del bucle –aunque no haya llegado a la décima iteración– y procederá a verificar nuevamente el tamaño de las partes real e imaginaria de z. (Al comparar con 10 el módulo de z resulta más sencillo comparar la suma de los cuadrados de las partes real e imaginaria de z con 100 que comparar con 10 la raíz cuadrada de la suma; en cualquier caso, el resultado sería el mismo.) Si, independientemente del número de iteraciones, se verifica que al menos la parte real o la parte imaginaria del valor final de z es menor que 10, el píxel de coordenadas (j,k) píntase de negro. En caso contrario, de blanco.

En la mayor parte de los ordenadores personales, los píxeles de coordenadas comprendidas entre 1 y 100 se encontrarán en una esquina de la pantalla. Para centrar la imagen puede ser necesario alterar los valores inicial y final de j y k. Por ejemplo, puede ser necesario hacer que j recorra los valores de 50 a 150, en lugar de los comprendidos entre 1 y 100.

Los restantes detalles sobre BIOMORFO tendrán que ser elaborados por los osados programadores. Me limitaré a recordar a los lectores que z, z_0 y c son todos ellos números complejos, y que es preciso sumarlos y multiplicarlos como tales. Por esa misma razón, cada sentencia de asignación del algoritmo que haga alusión a z, z_0 y c ha de representarse por dos sentencias de asignación en los lenguajes de programación habituales, una para las partes reales de los números y otra para sus partes imaginarias.

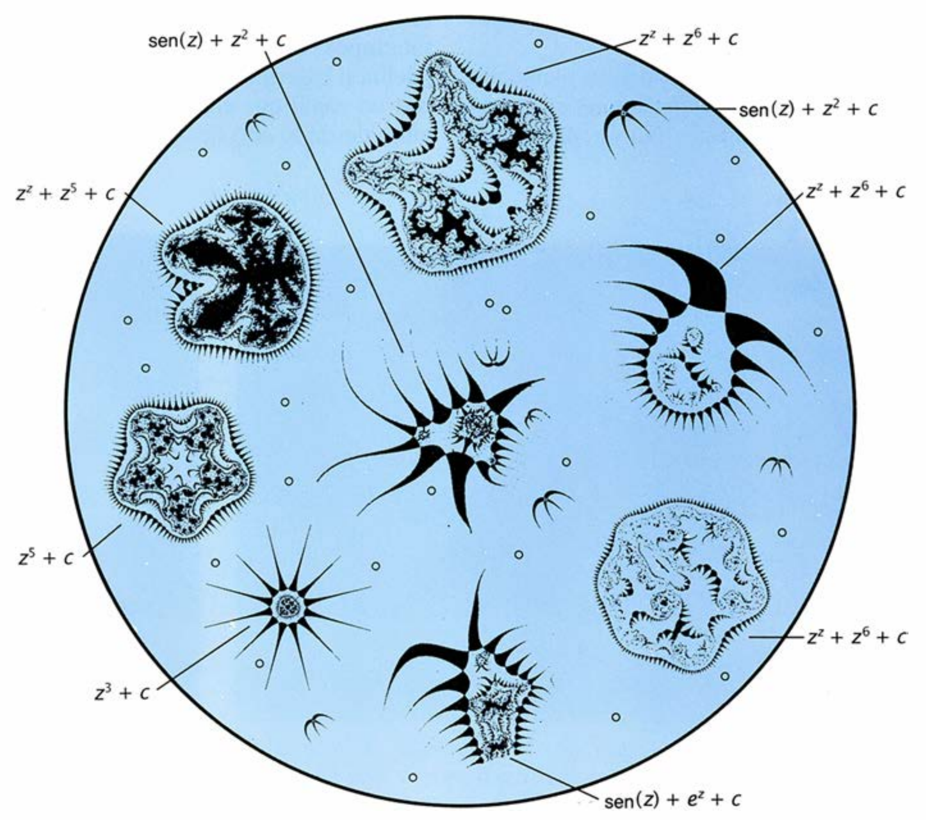
¿Cómo hacer visibles las restantes criaturas a través del imaginario microscopio de Pickover antes mostrado? En realidad, BIOMORFO puede producirlas igualmente bien. Lo único que se ha de hacer es sustituir la función a iterar, que es el alma del algoritmo, por otra diferente. En otras palabras, nos limitaremos a reemplazar la función $z^3 + c$ del programa anterior por otra distinta.

Es muy posible que quienes escriban el programa BIOMORFO deseen echar el anzuelo a otras criaturas que habitan en el cuadrado central de 20 por 20 del plano complejo. La búsqueda más sencilla consistiría en explorar toda la zona; después, podríamos ampliar la imagen, para inspeccionar los detalles de cualesquiera criaturas que la búsqueda preliminar haya dejado al descubierto. Normalmente, cualquier valor pequeño de c servirá de cebo.

Otras funciones generadoras de biomorfos recurren a una extraña potencia de z, la z^z; otras aún, echan mano de operaciones trigonométricas. Pickover ha tenido la bondad de acceder a enviar a quienes lo soliciten un breve resumen sobre los misterios de la trigonometría de los números complejos y sobre las potencias de base y exponente complejo. Armados con tal conocimiento estaremos en condiciones de escribir versiones de BIOMORFO que produzcan las morfologías protozoarias aquí mostradas.

Pickover entró en contacto con los biomorfos a resultas de un error de un programa que se proponía sondear las propiedades fractales de diversas fórmulas. Por un despiste, utilizó una conectiva OR (la disyuntiva incluyente "o") en lugar de una AND (la conjunción "y") en la condición que comprueba el tamaño de las partes real e imaginaria de z. Esa modificación inintencionada pinta de negro muchísimos más puntos que en el otro caso. Los cilios protuberantes de los biomorfos están sólidamente integrados por tales píxeles.

Aunque su creación se debiera a un azar feliz, los biomorfos parecen haber adquirido vida propia. Con palabras



1. Vista microscópica de algunos biomorfos y sus funciones generatrices

del propio Pickover : "En cierto sentido, las criaturas matemáticas existen. Moran estos objetos en el plano complejo, aunque se asemejen a organismos microscópicos que podríamos fácilmente imaginar floreciendo en una gota de agua de una charca." ¿En qué mar deberemos echar las redes en busca de formas de vida más avanzadas? Pickover también estima digno de señalar que la complejidad de los organismos naturales y artificiales sea resultado de la reiterada aplicación de sencillas reglas dinámicas.

El trabajo que actualmente realiza en su centro de investigación gira en torno a nuevos métodos para lograr que datos complejos resulten comprensibles de una ojeada. Por ejemplo, de ordinario se hace extremadamente difícil detectar regularidades o aleatoriedades en una página llena de ceros y unos, uno de los métodos fundamentales para presentar bits de datos. Empero, Pickover puede exhibir claramente el grado de aleatoriedad de los datos merced a un sencillo dispositivo gráfico basado en las teselaciones de Truchet, que reciben su nombre del P. Sébastien Truchet, monje y erudito francés. Pickover ha modificado las teselas primitivas de Truchet haciéndolas consistir en dos cuadrantes de círculo inscritos en un cuadrado, centrados en vértices opuestos y que interceptan los lados del cuadrado en sus puntos medios. La tesela resultante [*véase la figura 2*] solamente puede exhibir dos orientaciones distintas.

Al pavimentar una región plana con las teselas de Truchet aparecen extrañas curvas sinuosas. No quedan cabos sueltos, excepto en los bordes de la región. La continuidad de cada curva está garantizada, porque los puntos medios de los lados de cuadrados adyacentes (que es donde comienzan y acaban los cuadrantes de círculo) coinciden.

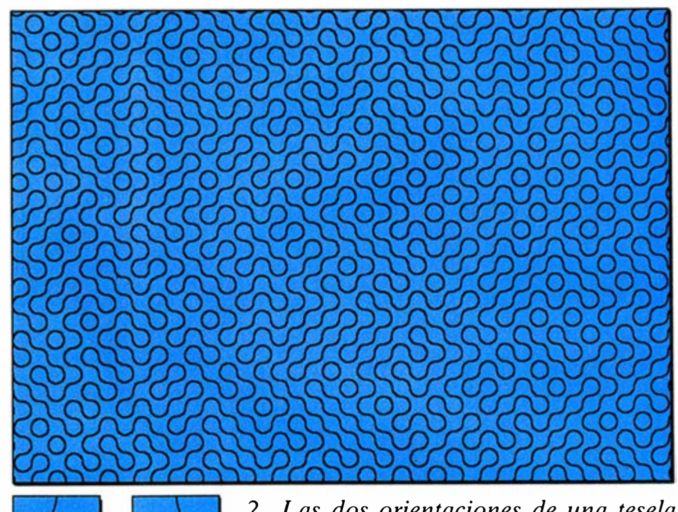
Cualquier matriz bidimensional de ceros y unos puede convertirse en una teselación de Truchet, sin más que disponer las teselas individuales en el mismo orden que los dígitos binarios, orientando la tesela de uno de los modos siempre que aparezca un 0, y en la orientación contraria cuando lo haga un 1. En el caso de que los bits de datos sean aleatorios, sostiene Pickover, no alcanzamos a discernir ninguna pauta o patrón particular en el teselado : las curvas trazan bucles y meandros de forma mareante (y fascinante).

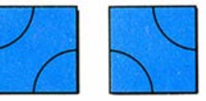
Introduzcamos, empero, un leve elemento de regularidad en los datos y se percibirán en seguida pautas definidas en las curvas. Por ejemplo, si se genera una matriz de bits en la cual es ligeramente más probable que a un 0 le siga otro 0 que un 1, y en la que también sea más probable que a un 1 le siga un 1 y no un 0, las curvas de la pavimentación correspondientes mostrarían una clara tendencia a correr al bies. Los lectores, no lo dudo, disfrutarán averiguando por qué es así.

A decir verdad, yo prefiero los motivos de pavimentos creados por bits enteramente aleatorios, como el que vemos en la ilustración. Estos pavimentos sugieren toda una pléyade de pasatiempos recreativos. Por ejemplo, ¿definen laberintos? Pruébese a encontrar un canal que conduzca todo el camino desde lo alto de la teselación hasta la base, o desde uno de los lados al otro. En el proceso de trazado de canales es corriente toparse con "islas", curvas que llegan a cerrarse sobre sí mismas. Desde luego, toda curva que no toque el contorno del cuadrado habrá de llegar, antes o después, a tropezar consigo misma. Algunas de estas curvas son circulitos; otras tienen forma de campánula, y no faltan otras más complicadas. Invito e insto a los lectores a clasificar los restantes tipos de curvas cerradas. ¿Cuál es su número medio por tesela?

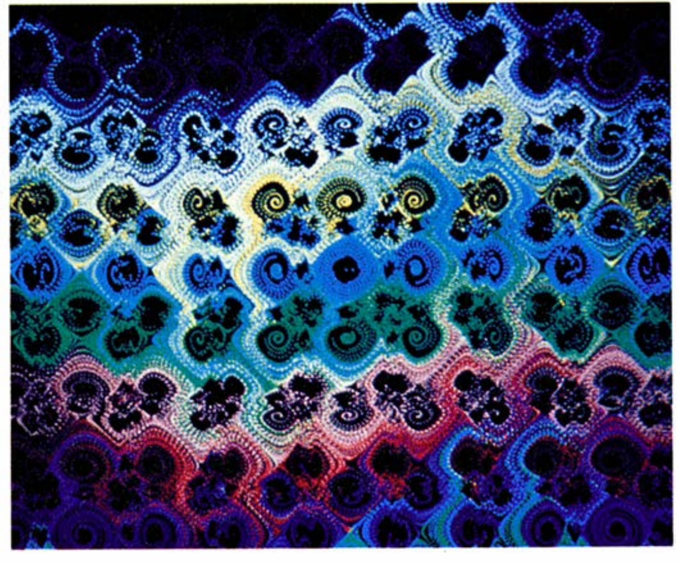
Es fácil escribir un programa que transforme bits en teselaciones de Truchet. Suponiendo que para empezar se tenga ya una tabla bidimensional de números binarios, lo único que hay que hacer es establecer un bucle doble que examine cada puesto de la tabla y trace la correspondiente tesela de Truchet en el lugar apropiado de la pantalla del ordenador. Tendrá que bastar con esta explicación para poder echar una ojeada a otra de las recreaciones gráficas de Pickover : las palomitas fractales.

Las palomitas de Pickover destacan, con una curiosa calidad táctil, en la figura 2. Constituyen, en realidad, una tracería generada por la solución de un par de ecuaciones diferenciales, iteradas en forma discreta. La abscisa x de un punto solución se calcula restando el valor de una función de y de la abscisa x de la solución previamente calculada. De igual manera, la ordenada x del punto se calcula restando el valor de una función α de y de la solución previa. Tal sistema de ecuaciones recibe el nombre de sistema cíclico. Los sistemas cíclicos basados en funciones trigono-





2. Las dos orientaciones de una tesela de Truchet (izquierda) *y una teselación aleatoria* (arriba)



3. Un sistema cíclico engendra palomitas fractales

métricas parecen ser fuente particularmente rica de gráficas espectaculares.

El proceso de iteración cruzada del programa PALOMITAS queda descrito por el par de ecuaciones:

$$x_{n+1} = x_n - h\text{sen}(y_n + \tan(3y_n))$$
$$y_{n+1} = y_n - h\text{sen}(x_n + \tan(3x_n))$$

Las funciones trigonométricas de ambas ecuaciones están multiplicadas por una pequeña constante h, con el fin de que los nuevos valores de x e y no se encuentren nunca muy lejos de los anteriores por mucho que prosiga la iteración. Pickover le da a h el valor 0,05 en su programa.

Como el siguiente esbozo de algoritmo nos indica, PALOMITAS itera las fórmulas 50 veces para cada uno de los 2500 pares de valores iniciales (x_0,y_0), dibujando cada vez un píxel sobre la pantalla del ordenador.

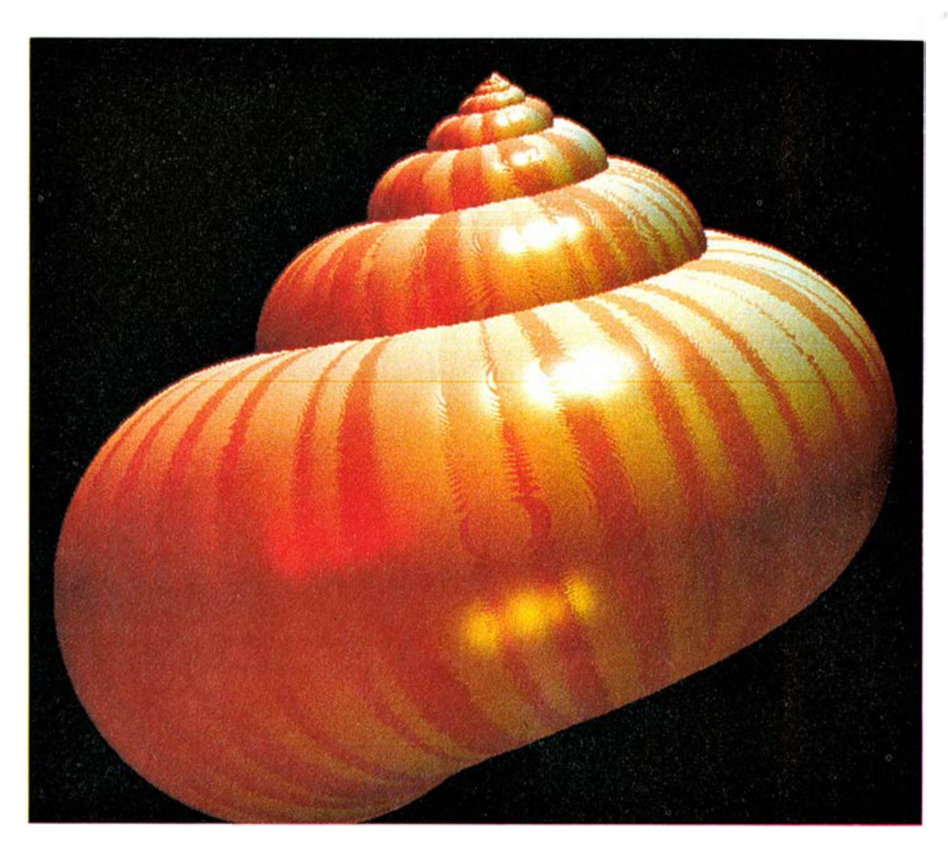
```
para j ⟵ 1 hasta 50
    para k ⟵ 1 hasta 50
        x0 ⟵ −6 + 0,24j
        y0 ⟵ −6 + 0,24k
        x ⟵ x0
        y ⟵ y0
        para n ⟵ 1 hasta 50
            xx ⟵ x − hsen(y + tan(3y))
            yy ⟵ y − hsen(x + tan(3x))
            x ⟵ xx
            y ⟵ yy
            computar jp y kp
            dibujar el punto (jp, kp)
```

(Las variables xx e yy son variables provisionales, utilizadas para seguir la pista a los valores actuales de x e y en el seno de un ciclo de iteración.)

Los valores iniciales de ambas coordenadas se eligen dentro de una región cuadrada de 12 por 12 unidades centrada en el origen del plano $x-y$. En otras palabras, los valores iniciales de x se encuentran entre -6 y $+6$, y otro tanto los valores iniciales de y. Al igual que BIOMORFO, el algoritmo de PALOMITAS se vale de una estructura de bucle doble para calcular un conjunto de valores iniciales. En PALOMITAS, sin embargo, ambos bucles recorren de 1 a 50.

Finalmente, es preciso dibujar mediante píxeles, en la pantalla, los puntos especificados por los 50 pares (x,y) generados a partir de cada valor inicial (x_0, y_0), tarea de la cual está a cargo una sencilla fórmula que ajusta la escala y desplaza x e y hasta jp y kp.

$$jp \longleftarrow 4{,}166x + 25$$
$$kp \longleftarrow 4{,}166y + 25$$



4. Una función logarítmica produce una concha de caracol

Las palomitas fractales de Pickover están formadas, pues, por todos los píxeles cuyas coordenadas resulten de las iteraciones. Los lectores son libres de amplificar diferentes piezas de las palomitas y descubrir detalles y filigranas completamente inesperados. También pueden "teñir" las palomitas, como hace Pickover, dibujando los píxeles de diferente color cada vez que se inicia la ejecución del bucle interior.

Los gráficos de Pickover han merecido el interés del público en más de una ocasión. Su trabajo ha sido comentado en diversos artículos de revistas y ofrecido por televisión; ha sido incluso expuesto en Suiza, Japón y en el Museo de la Informática, en Boston.

Concluiré el artículo llamando la atención del lector sobre una de las últimas creaciones de Pickover: una preciosa concha de caracol, que sorprende por el realismo de su colorido y realce. La imagen, que podemos admirar en la figura 4, está construida mediante una sucesión de esferas cuyos centros describen una grácil espiral logarítmica. Los efectos de realce y reflejo se han generado mediante una técnica de seguimiento de rayos reflejados que remeda diversas clases de reflexiones luminosas.

Para obtener las directrices sobre aritmética compleja o para recibir bibliografía especial sobre los artículos de Pickover, los lectores pueden escribirle a: IBM Thomas J. Watson Research Center, Yorktown Heights, N.Y. 10598.

Fue tema del pasado mes de mayo el vandalismo informático, esto es, la confección y difusión de programas malignos capaces de multiplicarse y causar daños a los benignos. La plaga de estos "virus" y "gusanos" informáticos continúa. Hacía más de un año que venían circulando rumores de un nuevo virus que atacaba a los programas de hoja electrónica, rumores ahora confirmados. Harold J. Highland, experto en virus y redactor jefe de la revista *Computers and Security*, ha bautizado al agente infeccioso como "macrovirus", porque consiste en comandos especiales llamados "macros".

Resulta difícil localizar denuncias de macrovirus, según parece, porque éste ha atacado a grandes sociedades anónimas, nada amigas de facilitar al público detalles de esta índole. Una de las versiones del virus parece estarse extendiendo por la popular hoja Lotus 1-2-3. Cada vez que un usuario hace funcionar un programa infectado, el virus toma al azar en la memoria una hoja de cálculo, altera en una pequeña cantidad el contenido numérico de una sola

La adición de complejos se efectúa sumando por separado sus respectivas partes real e imaginaria. O sea, la suma de los complejos representados por $a + bi$ y $c + di$ es $(a + c) + (b + d)i$.

El producto de dos números es un poco más complicado. Está dado por $(ac - bd) + (ad + bc)i$. Aplicando esta fórmula es fácil deducir la del cuadrado de un complejo $a + bi$, que $(a^2 - b^2) + 2abi$. La parte real del cuadrado es $(a^2 - b^2)$ y la imaginaria, $2ab$.

Aplicando, una vez más, la fórmula de la multiplicación se obtiene otra fórmula más, la correspondiente a la tercera potencia de $a + bi$. La parte real de $(a + bi)^3$ es $a(a^2 - 3b^2)$ y su parte imaginaria es $b(3a^2 - b^2)$.

5. La aritmética de los números complejos

de sus celdillas y devuelve a la memoria la hoja modificada. Los daños que el virus puede causar son potencialmente grandes, dado que estos pequeños cambios de los datos pueden pasar inadvertidos durante meses y afectar empero, seriamente, los resultados de los cálculos de la hoja.

A pesar de tales pruebas, Tom Pittman opina que el artículo de mayo fue una reacción desmesurada por mi parte. Según Pittman, hay que tener cuidado en distinguir entre virus útiles y virus destructivos. La diferencia puede ser puramente semántica. Existen, sin duda, ciertos programas útiles que arrastran una vida viral o incluso de gusano. Se ocupan de tareas que van desde la compresión de archivos a la exploración de las entradas, pero estos programas no son denominados virus ni gusanos.

Edwin B. Heinlein, de Mill Valley, California, insistiría en la creación de un Centro de Control de Infecciones Informáticas, organizado a semejanza del existente para humanos en Atlanta. Tal centro formaría parte de un más amplio esfuerzo por estudiar y categorizar los virus y para promulgar leyes sobre la obligación de dar cuenta de los brotes virales y la represión de esta delincuencia. La investigaciones efectuadas en tal esfuerzo podrían proporcionar igualmente nuevos filtros y esquemas de detección de virus.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

BIOMORPHS: COMPUTER DISPLAYS OF BIOLOGICAL FORMS GENERATED FROM MATHEMATICAL FEEDBACK LOOPS. Clifford A. Pickover en *Computer Graphics Forum*, vol. 5, págs. 313-316; 1986.

MATHEMATICS AND BEAUTY: TIME-DISCRETE PHASE PLANES ASSOCIATED WITH THE CYCLIC SYSTEM. Clifford A. Pickover en *Computers and Graphics*, vol. 11, n.º 2, págs. 217-226; 1987.

Libros

Darwin, darwinistas y neoantidarwinistas

Luis Alonso y Antonio Prevosti

The correspondence of Charles Darwin. Volúmenes 3 y 4. Edición preparada por Frederick Burkhardt y Sydney Smith. Cambridge University Press, 1987-1989.

Cubre el tercer volumen el epistolario de los años 1844-1846 y el cuarto, el trienio 1847-1850. Quizá pueda decirse sin violentar la verdad que, en la historiografía darwinista, hay un antes y un después de la publicación de sus cartas. Intentaré razonarlo.

Con motivo del centenario de la aparición del *On the Origin of Species* (Londres, 1859) comienza, o se asienta, por mejor decir, un nuevo enfoque en el estudio de la cuestión darwinista. Podemos ejemplificarlo en el trabajo sobre los precursores de la teoría de la evolución trenzado por Bentley Glass, Owsei Temkin, William L. Strauss, Jane Oppenheimer y Charles C. Gillispie, entre otros, dentro de la línea marcada por Arthur O. Lovejoy y sus espléndidos capítulos sobre la tesis de la graduación de los seres en el siglo XVIII. Se intenta poner a Darwin en su sitio, lo que, lejos de restarle méritos, servirá para dar realce a su figura. Coincide ese período con la eclosión de distintas aportaciones a la historia de la biología por parte de varios centros universitarios norteamericanos, que tomará cauce en diversas series de publicaciones y en la creación, en Harvard, de un órgano de expresión liberado del patronazgo médico. La obra de Darwin, su influencia, ramificación, etcétera, será tema de investigación incesante.

Culmina esa fase en la celebración de otro centenario: el de la muerte del naturalista, acaecida en 1882. Significativamente, el mayor esfuerzo omnicomprensor convergió en un libro que lleva por título *The Darwinian Heritage* (Princeton, 1985). Afirmaríase hoy que nada queda por descubrir de su vida y escritos. Sus años mozos, sus maestros, sus cuadernos de notas y apuntes de viajes, sus incursiones en la geología, su lamarckismo, su teoría embriológica, el desarrollo de la idea de evolución, sus forcejeos con el proceso de adaptación, la fecha en que se le ocurre el mecanismo de la selección..., y hasta sus afanes más íntimos han salido a la luz desde distintas ópticas. Se ha hablado de la "fábrica Darwin" por el número de tesis, artículos y libros que cada año se editan tomándole por motivo de inquisición. Y aunque alguno le gana en esa carrera (Einstein, por ejemplo) no parece que sean muchos los que vayan por delante o le igualen.

Pero esa sensación de saturación y hartazgo se desvanece con la lectura de la correspondencia, recuperada y anotada magistralmente por Burkhardt y Smith. Las cartas que escribe o recibe suelen ir en corto y por derecho al núcleo de la cuestión. Supone en el interlocutor que está al corriente de su modo de pensar y le pide pruebas que corroboren su sospecha o intuición, sea en el tema de la especie, en la formación de las montañas o en la distribución geográfica de las plantas. (Darwin sabe muy bien quién le va a entender en cada campo, aspecto este sorprendentemente inexplorado todavía.)

A modo de inciso, el comentario de un libro que a uno le ha gustado y al otro le parece menos bueno. Le escribe J. D. Hooker el 30 de diciembre de 1844: "He disfrutado con *Vestiges*, por el aluvión de datos que trae, aunque discrepo absolutamente de sus conclusiones; debe ser un personaje divertido..." A lo que Darwin le contesta el 7 de enero de 1845: "También lo he leído yo, pero lo encontré menos entretenido que lo que a Ud. le parece; el relato y la organización del mismo son ciertamente admirables, pero lo veo mal en geología y peor en zoología." (La autoría de la obra, lo escribió Robert Chambers en 1844, y el contenido de la misma fue objeto de un interesante debate en esa década y la siguiente.) Hooker constituye el destinatario central de las misivas en el tercer volumen. Su preparación botánica y su renuencia a admitir la hipótesis de la transformación de las especies obliga a Darwin a pulir sus pruebas. Al otro interpelante principal, Charles Lyell, le reprocha, sin salirse de la admiración y fidelidad que siempre mantendrá a sus ideas, que sea tan parco en historia natural, juicio que hoy todavía vemos repetido en todas las historias de la geología; o le pone sutilmente a prueba sobre la nueva química, en una cita indirecta de Liebig.

El volumen cuarto nos confirma la tenaz actividad científica de Darwin. Su aprecio por la biología francesa a través de la lectura de los *Annales des Sciences*. Es el tiempo en que se dedica con especial ahínco a los cirrípedos: su correspondencia a este respecto con Agassiz, quien será el máximo oponente, años más tarde, de la teoría de la transformación en Estados Unidos, aclara el juicio dolorido ante Gray que Darwin manifestará por tal discrepancia llegado ese momento. Otros asuntos que reclaman su atención siguen siendo de orden geológico: la solidificación de la lava, el levantamiento de las zonas costeras, los cráteres y la acción de los glaciares.

El nuevo Darwin que emerge de la lectura de su correspondencia no altera las líneas generales de lo ya descubierto y analizado. No corrige las tesis darwinistas exudadas de las investigaciones precedentes. Pero permite entenderlas mucho mejor, contextualizarlas, amén de ofrecernos perfiles inéditos del protagonista, de Hooker o de Milne, por ejemplo. Sabida es, y confesada, su magra preparación botánica en un comienzo, aunque las plantas le ofrecían múltiples posibilidades para justificar su idea de la evolución. El lector asiste a una interesante pugna interior del convencido de su intuición y la falta de conocimientos necesarios para corroborarla. Esa es otra vía abierta que está esperando caminante.

El aparato bibliográfico, las notas escuetas y oportunas, así como un índice exhaustivo, mantienen el tono de alto nivel, reconocido unánimemente, de los dos tomos precedentes (L. A.)

El relojero ciego, por Richard Dawkins. Labor; Barcelona, 1988.

En la última década han surgido numerosas teorías sobre la evolución biológica que se presentan como contradictorias. No obstante, analizando su contenido se observa que tienen aspectos complementarios. Las discrepancias pueden ser debidas a que se basan en puntos de vista parciales de la gran complejidad biológica. Un ejemplo de ello son dos libros cuyas recensiones nos ha parecido oportuno e interesante unirlas en este número de la revista. Antepongamos a las mismas unos párrafos introductorios.

La funcionalidad de las propiedades de los seres vivos, basada en su alto ni-

vel de organización concurrente con una complejidad mucho mayor que la de los seres inorgánicos, es, para muchos biólogos, su característica más distintiva. Desde Aristóteles, con diferentes matices, ha sido común considerar que estas propiedades son una manifestación de finalidad o de diseño. En la primera mitad del siglo pasado, cuando Darwin desarrolló su teoría de la evolución y su explicación por selección natural, esta idea imperaba en Europa. En Inglaterra, la obra de Paley *Teología Natural - Pruebas de la Existencia y Atributos de la Divinidad obtenidas con la observación de la Naturaleza*, publicada en 1802, era el principal exponente de esta visión de la naturaleza e influyó en la de Darwin antes de que sus propias observaciones le sugirieran la idea de evolución. Este es el motivo de que, al tratar de explicar la evolución por procesos naturales, considerara necesario demostrar que el origen de la complejidad funcional de los seres vivos puede entenderse sin diseñador. En la idea de la selección natural encontró lo que buscaba.

A pesar de que el darwinismo pronto convenció a muchos biólogos, su aceptación nunca ha sido general. Ha habido, incluso, períodos en los que ha pasado por una verdadera crisis, como a finales del siglo XIX y principios del XX (véase P. J. Bowler, *El eclipse del darwinismo*, Labor, 1985). De este eclipse, no obstante, el darwinismo resurgió reforzado al encontrar en la genética mendeliana un fundamento que le faltaba; paradójicamente, todo lo contrario de lo que pensaron los primeros mendelianos como De Vries, Bateson y otros. Actualmente, después de unas décadas de vigencia casi indiscutida, sigue constituyendo la "ortodoxia evolutiva"; pero desde distintos campos han surgido también numerosos críticos, a veces tan apasionados como algunos de sus defensores.

Con la síntesis de la genética y el darwinismo surgió el neodarwinismo, desarrollándose una disciplina, la genética de poblaciones, que ha obtenido pruebas de la acción de la selección natural estudiando directamente la naturaleza y realizando experimentos de laboratorio. Mas, estos estudios sólo son posibles en el nivel inferior al de la especie y, por tanto, la demostración de cambios producidos por la selección natural está restringida a la evolución de las poblaciones y a la diferenciación de éstas dentro de la especie, es decir, al nivel microevolutivo. A pesar de ello, los darwinistas, para explicar "cómo" se ha originado la complejidad funcional, extienden estos resultados a todos los niveles de la variabilidad observada en los seres vivos.

A diferencia de la investigación del "cómo" de la evolución, el estudio de las leyes que regulan cuál es su resultado, el "qué" de la evolución, sólo es posible considerando la variabilidad biológica globalmente, es decir, el nivel macroevolutivo. La oposición total o parcial al darwinismo de algunos estudiosos de la evolución procede, principalmente, de los que la abordan desde este punto de vista. Los estudios macroevolutivos indican que en los organismos se presentan caracteres no adaptativos, determinados por constreñimientos de distinta naturaleza, y para explicarlos algunos sostienen que el darwinismo sólo es válido en la microevolución, mientras que para comprender la macroevolución deben seguirse caminos distintos. Otros van más allá, creen que darwinismo no es aceptable a ningún nivel. Entre estos últimos se encuentra el autor de la teoría de la autoevolución, desarrollada en el libro de Lima-de-Faria, que abordamos más abajo.

En esta recensión y en la que sigue se analizan dos obras que tienen en común estar escritas con apasionamiento, aunque parten de puntos de vista diametralmente opuestos. Richard Dawkins es totalmente darwinista; sin embargo, para A. Lima-de-Faria, en la evolución, desde las partículas elementales hasta la cultura humana, las propiedades de la materia se van manifestando automáticamente. Lima-de-Faria no admite que en los niveles biológico y cultural se manifiesten propiedades diferentes del nivel fisicoquímico. En este sentido es un representante de las posiciones más radicales entre los oponentes actuales al darwinismo, que quieren acercar la biología a la física, el prototipo de las ciencias. Nos ha parecido interesante presentar la recensión de su libro junto con la de Dawkins, por creer que su radicalismo puede ayudar a entender un aspecto importante de la actual división de los estudiosos de la evolución, entre darwinistas y antidarwinistas.

El título del libro de Dawkins refleja la paradoja que la selección natural explica, la existencia de diseño sin diseñador. Centra con precisión cuál es el *quid* del darwinismo. Partiendo de que la complejidad de diseño es distintiva de la vida, considera al darwinismo la única teoría conocida que la explica en términos naturales. De ello está profundamente convencido Dawkins y lo manifiesta en el apasionamiento que destila toda su exposición. En la primera página del Prefacio dice: *Si alguien no está de acuerdo con que este diseño tan complejo pide a gritos una explicación, me rindo; pero no, pensándolo bien no me rindo, porque una de las finalidades de este libro es transmitir algo de la gran maravilla de la complejidad biológica, a quienes no se les han abierto los ojos a ella.* Además es plenamente consciente de su apasionamiento. Lo afirma así: *Este libro no es un tratado científico desapasionado... Lejos de ser desapasionado, tengo que confesar que algunas partes están escritas con una pasión que, en una revista científica profesional, podría provocar comentarios. Por supuesto, se trata de informar pero también de persuadir e incluso –es lícito especificar los propósitos sin presunción– de inspirar.*

La defensa de Dawkins del darwinismo se apoya poco en datos de observación o experimentales. Hace un análisis principalmente teórico. Utiliza argumentos para demostrar que la explicación científica más consistente de que disponemos del origen de la complejidad organizada de los seres vivos se basa en el aprovechamiento de la mutación al azar por la selección natural. Trata de las propiedades de los seres vivos casi únicamente para patentizar su extraordinaria complejidad de diseño (cap. 2), eligiendo un ejemplo que le sirve para presentar una visión maravillosa de la vida. Describe el mundo de los murciélagos, construido mediante la percepción de lo que les rodea con el sonar, adaptándose así a la vida sin luz. En estas condiciones no es posible un mundo óptico, como predominantemente es el nuestro; pero con el sonar, con un gran refinamiento del sentido del oído, los murciélagos adquieren una exquisita percepción de lo que les rodea y se desenvuelven en su mundo de tinieblas tan operativamente como otros animales lo hacen sirviéndose de la vista. El origen del sonar –que los murciélagos utilizan para detectar los insectos de los que se alimentan, para percibir los obstáculos con los que pueden colisionar, para reconocer el sexo de los individuos de su especie– es una cuestión esencial para el biólogo a la que debe contestar en términos científicos. Para Dawkins y para todos los darwinistas, la respuesta es que se ha originado por un proceso evolutivo de acumulación de cambios graduales ocurridos al azar, que cuando son favorables para la supervivencia de la especie se fijan por la acción de la selección natural.

El origen de un diseño complejo por un proceso natural requiere un mecanismo que haga probable lo que parece muy improbable, sin la intervención de

un diseñador. Este es el tema del primer capítulo, titulado "Explicar lo muy improbable". Muchos rechazan el darwinismo porque no entienden cómo la selección natural hace probable lo improbable. Argumentan que la complejidad de los seres vivos, precisamente lo que la selección natural explica, no puede ser un resultado del azar. Mas, en realidad, la selección natural es todo lo contrario del azar. Aprovecha los cambios aleatorios producidos por las mutaciones para llevar la evolución orgánica por vías que no tienen nada de aleatorias. *El azar y la necesidad*, el título del conocido libro de Jacques Monod, se refiere precisamente a esta característica de la evolución por selección natural. La probabilidad de que la ordenación de aminoácidos de una proteína con una función determinada se haya podido producir "en una jugada afortunada" resulta tan pequeña, que es razonable rechazar la idea de que las proteínas de los seres vivos se hayan originado así. Mas, la selección natural no se basa en grandes jugadas de suerte, sino en la acumulación de pequeñas jugadas afortunadas. Lo que hace es conservar y acumular estas pequeñas jugadas. Para hacer comprender esto, Dawkins (cap. 3) pone al día el clásico símil de los monos mecanógrafos mediante un modelo de simulación con ordenador. Después, en el capítulo 4, insiste sobre la improbabilidad de que las mutaciones útiles para la evolución sean de efectos grandes. Parece evidente que cuanto más pequeño sea un cambio al azar más fácil será que sea rechazado por la selección natural. No obstante, conviene señalar que las discrepancias sobre este punto se deben a que los autores frecuentemente no están de acuerdo sobre qué magnitudes de cambio pueden calificarse de grandes o pequeñas.

Muchos darwinistas pasan por alto un importante aspecto del proceso evolutivo: los resultados de la evolución están sometidos a constreñimientos de diverso tipo, ambientales, históricos, de desarrollo, morfológicos, etcétera. A esta omisión se refieren algunas de las críticas actuales al darwinismo. En el capítulo 4, al tratar de la semejanza de los resultados de la evolución en líneas evolutivas independientes, se considera un poco esta cuestión, pero es en el 11 donde se hace más profundamente. En este capítulo Dawkins simula una discusión entre un darwinista *de la vida real* y otro cuyas ideas son una *caricatura del darwinismo*. Según este último, la selección natural es omnipotente y piensa que puede conducir a cualquier resultado, por absurdo que sea. Esto se lo refuta el darwinista *de la vida real*. Hace ver así el significado de los constreñimientos para la evolución. Cuáles son los límites que éstos determinan en los procesos evolutivos es una cuestión importante sobre la que nos falta mucho por conocer.

Una distinción fundamental entre los seres vivos y los inorgánicos es tener un componente, el genoma, donde codifican información. La facultad de codificar información hace posible la selección natural, por lo que ésta se comprende mejor conociendo las características del genoma. Estas se explican en el capítulo 5, comparándolas con las de la tecnología informática. Así, la simulación de la selección natural por ordenador expuesta en el capítulo 3 adquiere mayor significación.

La vigorosa argumentación en favor del darwinismo se complementa con una discusión de las principales interpretaciones alternativas de la evolución, tanto clásicas como actuales. Algunas las descalifica como alternativas reales. Este es el caso del neutralismo, porque no se refiere a la complejidad funcional, para cuya explicación Darwin formuló su teoría. Que exista variabilidad neutra, lo que es especialmente evidente en el nivel molecular, cabe perfectamente en el darwinismo, si éste no se entiende como el darwinista que lo caricaturiza presentado en el capítulo 11. Opina lo mismo de la teoría de los equilibrios interrumpidos. Según él, el término gradualista utilizado por los partidarios de dicha teoría es, en cierto modo, un hombre de paja inventado por ellos, un molino de viento para sus lanzas, que es una caricatura de la idea gradualista que tiene todo evolucionista sensato. Según Dawkins, a los que propugnan la teoría de los equilibrios interrumpidos se les escucha más porque venden sus ideas como revolucionarias, que por estar en lo cierto. Considera, no obstante, que hacen una aportación positiva a la evolución demostrando la existencia de largos períodos de estasis, pero cree que este aporte no les sitúa fuera del darwinismo. Otras alternativas, como el mutacionismo, el lamarckismo y el impulso molecular los refuta arguyendo, principalmente, que no sirven para explicar la complejidad y funcionalidad de los seres vivos, es decir, con el argumento fundamental, recurrente a lo largo de todo el libro.

Admite que en la evolución quedan cosas por explicar y, entre ellas, destaca el origen de la vida, del que trata en el capítulo 6, "Orígenes y milagros".

El relojero ciego, escrito con fluidez, está lleno de símiles, parábolas e imágenes que, además de facilitar la comprensión de los argumentos del autor, amenizan la lectura, rompiendo la aridez de una exposición menos imaginativa. (A. P.)

EVOLUTION WITHOUT SELECTION. FORM AND FUNCTION BY AUTOEVOLUTION, por A. Lima-de-Faria. Elsevier; Amsterdam, 1988.

La teoría de la autoevolución desarrollada por Lima-de-Faria no considera en absoluto necesario explicar la complejidad funcional de los seres vivos como algo que contrasta con las propiedades de los seres inorgánicos. En esto el autor es tan rotundo como Dawkins al hacer el planteamiento totalmente opuesto. Así, en la introducción de su libro dice: *Lo que aquí debe quedar claro es que si en biología queremos una teoría formulada con el mismo rigor matemático y con igual capacidad de predicción que las verdaderas teorías tienen en la química y en la física, la conclusión es ineludible. Nunca ha habido una teoría de la evolución. ... Recientemente se han hecho muchos ajustes y tentativas de compromiso con el neodarwinismo. En mi opinión no hay sitio para un compromiso con el darwinismo o el neodarwinismo.*

En la primera parte del libro, que comprende tres capítulos, titulada "No conocemos el mecanismo de la evolución", descalifica la selección natural como componente del mecanismo de la evolución. Para ello utiliza argumentos como los siguientes: *En la física, la química o la bioquímica no hay selección*; o *La selección natural no puede pesarse, almacenarse o verterse en un tubo de ensayo.*

En la segunda parte (nueve capítulos) compara las características de los seres vivos con las de los inorgánicos, estableciendo gran número de semejanzas con las características de la evolución de las partículas elementales, de los átomos y de los compuestos minerales. Muchas de estas comparaciones tienen interés, pero no suelen aportar pruebas en contra del darwinismo. La oposición radica en que el punto de partida es completamente opuesto al de éste. Cualquier darwinista podría utilizarlas, como lo hace Dawkins cuando trata del radar de los murciélagos, para hacer entender su propio punto de vista. Por ejemplo, en el capítulo 5 "La huella de la física" trata, de forma interesante, de la percepción de la gravedad por los seres vivos y de su efecto sobre la formación de los órganos. Considera que la gravedad determina la polaridad de las plantas, el

geotropismo positivo de las raíces y el positivo de los tallos, el funcionamiento de los granos de almidón como estatolitos, para la percepción de la gravedad en las células vegetales, etc. En los animales se refiere a la estratificación de las macromoléculas informacionales en el huevo según su densidad, en relación con el desarrollo. También indica que la reacción del cuerpo animal a la gravedad es constante. Mas, párrafos como el siguiente, escrito al tratar de los problemas que se les presentan a los astronautas en relación con la gravedad, lo podría suscribir completamente Dawkins: *Normalmente la gravedad está contrarrestada por el cuerpo humano. Si no fuese así, al pasar de la posición horizontal a la vertical la gravedad haría bajar la sangre a los pies. El cerebro se quedaría sin sangre si no existieran barirreceptores que perciben y miden la presión sanguínea e inmediatamente emiten señales que tienen dos consecuencias: el corazón se acelera y los vasos de las partes inferiores del cuerpo se constriñen. Así se mantiene la misma presión sanguínea en el cerebro que en los pies.* En otros casos, los datos que aporta están tratados con superficialidad. Algunas comparaciones son correctas, por ejemplo cuando dice que la disposición de las moléculas de $CaCO_3$ es idéntica en los cristales de calcita mineral y en los biocristales de la misma sustancia. En este, como en otros casos, sólo demuestra que las leyes de la física y la química son las mismas en el mundo orgánico que en el inorgánico, de lo cual no duda ningún darwinista. Otras veces, la comparación se basa en una apariencia más ligera; por ejemplo, cuando dice que la capacidad de regeneración de los cristales es sorprendentemente semejante a la de las *Planarias*.

Una importante contribución del desarrollo de la biología molecular al conocimiento de los procesos de formación de las estructuras y orgánulos celulares es el descubrimiento de la capacidad que tienen las moléculas de autoensamblarse, integrándose en un nivel de complejidad superior. De ello se ocupa en los capítulos 13 a 15. Atribuye especial importancia al autoensamblaje en su modo de concebir la evolución, afirmando: *El autoensamblaje, con sus características intrínsecas y espontáneas, es la consecuencia visible de la autoevolución.*

En los capítulos 16 a 22 presenta su manera de ver las relaciones de los organismos con el ambiente. Esta parte de la obra trata específicamente del aspecto de la organización biológica que para el darwinismo requiere una explicación, la complejidad de diseño. En los capítulos 16 a 18 se plantea la cuestión de *cómo los organismos contrarrestan los componentes físicos y químicos, así como el ambiente y la muerte*. Es interesante la siguiente cita textual del autor: *Las raíces son órganos que crecen hacia el centro de gravedad, pero los tallos son grupos de tejidos que crecen en dirección opuesta, es decir, que* han aprendido *a contrarrestar la gravedad.* Escrita por un darwinista esta frase sería un reconocimiento de la existencia de diseño. En particular "han aprendido", cuyo subrayado corresponde al énfasis con que lo destaca el autor, parece estar totalmente de acuerdo con el punto de vista darwinista. No obstante, la intención de Lima-de-Faria es completamente distinta, como puede verse en lo que sigue: *El cromosoma no necesita selección para conservar, innovar o explorar. El cromosoma contiene en sí mismo todos los mecanismos necesarios para conseguir estos tres procesos.*

La conservación la atribuye a los mecanismos de reparación del ADN y a la capacidad de los cromosomas de eliminar segmentos propios, cromosomas enteros o conjuntos de cromosomas; la innovación, a la recombinación genética tal como ocurre en los genes que controlan el sistema inmunológico. La exploración sería el cambio de las vías genéticas hacia nuevos senderos funcionales, gracias a los cambios estructurales de los cromosomas, dependientes de la *propiedad única* del ADN de poder partirse y reunirse. *El aspecto significativo es que el cromosoma hace esto dentro de sus propios límites y con la ayuda de sus propias herramientas moleculares. Sólo necesita la inmersión en una célula de la cual adquiere las moléculas necesarias.* Para un darwinista estas explicaciones no son una alternativa a la selección natural. Al contrario, dan una visión de la organización biológica en la que el diseño se manifiesta más fuertemente que en lo que tratan de explicar.

En los capítulos 19 a 22 expone muchos de los numerosos efectos que el ambiente tiene sobre los organismos y los considera determinantes directos de la evolución. Los efectos directos del ambiente sobre el fenotipo serían cambios evolutivos. Elimina así en gran parte el papel de los genes, aunque les reserva alguno. Mas, en este caso, la inducción somática, produciendo cambios en los genes, sería importante en la producción de cambios adaptativos; es decir, las mutaciones adaptativas se explicarían en términos lamarckistas.

En los últimos capítulos (23 a 29) se tratan varios temas generales. El papel de la simbiosis en la evolución, la adaptación explicada por autoevolución, el papel del gen y del cromosoma valorados por la autoevolución, autoevolución y sociobiología, relaciones entre la física y la biología. Termina estableciendo los 56 principios de la autoevolución y contrastando la autoevolución con el neodarwinismo.

Como ya se ha dicho, Lima-de-Faria defiende una posición extrema en el antidarwinismo, tratando de reducir la biología totalmente a la física, aunque el capítulo 27 esté dedicado a demostrar que *No es la biología la que se ha de modificar sino la física.* Hacia dónde dirige los tiros queda claro citando lo que dice al final de este capítulo: *La segunda ley de la termodinámica no se aplica a los organismos vivientes por las siguientes razones. 1. Los organismos no son sistemas cerrados. 2. Los organismos no son máquinas. 3. Los organismos canalizan energía.*

Debido al extremismo de su posición, su planteamiento antidarwiniano es menos razonable que el de otros autores. Repetidamente presenta el darwinismo como si pretendiera que las leyes de la física y de la química no son vigentes en los seres vivos. Considera que la existencia de evolución fisicoquímica (de las partículas elementales, los elementos químicos, las moléculas, los minerales, etc.) es un conocimiento muy reciente que cambia la perspectiva de lo que es la evolución biológica y desvirtúa el darwinismo. Critica a éste por excluir cualquier homología o analogía entre los minerales, las plantas y los animales. Dice que, para el darwinismo, todas estas analogías serían simples accidentes o curiosidades. También le achaca atribuir a los genes todos los tipos de modelos que presentan los seres vivos, a pesar de que también se presentan en los minerales que no tienen genes y de que, hasta hace poco, se consideraba que las plantas tenían genes completamente diferentes de los propios de los animales.

El aspecto positivo del libro de Lima-de-Faria es el significado que atribuye a los constreñimientos como determinantes de las vías seguidas por la evolución y los datos que aporta sobre ello. El darwinista realista de Dawkins considera evidente este significado. Pensar lo contrario no sería científico. Mas, no todos los darwinistas opinan así, pues algunos tienden a presentar la selección natural como prácticamente omnipotente. En realidad, una cosa es explicar "cómo" las propiedades de los seres vivos se han podido originar y otra "qué" son. (A. P.)

Apuntes

También el desarrollo científico prepara la democracia y fomenta la igualdad. Así lo reconoce *Nature* en el bicentenario de la Revolución Francesa que se cumple este año. En los siglos XVII y XVIII, dos instituciones fuertes, el ejército y la Iglesia, aportaron medios suficientes para que los individuos capaces pudieran aplicarse a la ciencia; el primero, por ejemplo, a través de los centros militares que se transformarían en las *grandes écoles*. Laplace unió la tradición cartesiana con la corriente newtoniana en su *Exposition du Système du Monde*. A Lavoisier los jacobinos le segaron la cabeza, pero su escuela mantuvo la bandera de la razón. Nieto de la revolución fue Pasteur, sin cuya existencia la ciencia de nuestro siglo hubiera nacido desasistida.

En la cadena de la evolución faltan muchos eslabones. Y si todas las anillas son necesarias, algunas resultan realmente apremiantes. ¿Cómo aparecieron las plantas con semillas, es decir, las gimnospermas y las angiospermas? Parece obvio que surgieran de antepasados portadores de esporas. Los restos paleontológicos nos mostraban ya, sin embargo, los sacos polínicos bien formados. Un fósil del Carbonífero francés pudiera encerrar la clave: si no se trata de un espécimen inmaduro, posibilidad que parece desechable ante la extraordinaria conservación del ápice seminal, nos hallaríamos ante una estrategia de reproducción intermedia entre la fecundación pteridófita (la de los helechos, por ejemplo) y gimnospérmica (verbigracia, la de las coníferas), en la que, a falta de cámara polínica, hubiera sólo un ápice nuclear.

¿Por qué las células de un mismo tumor no muestran la misma eficacia? Porque no todas las células cancerosas son iguales. Esta manifiesta tautología resume la incapacidad de los científicos ante la fuerza metastizadora de algunas células, cuyo conocimiento allanaría el camino de la terapia oncológica. Pero la ciencia no ha bajado la guardia. Se sabe ya que el gen *ras* de una cincuentena de oncogenes se activa antes de comenzar la metástasis; caen, por deleción, fragmentos de tres cromosomas que presumiblemente comportan la pérdida de genes que frenan la metástasis; influye la metilación del ADN; el tumor fomenta la producción de factor de crecimiento; interviene la interacción entre el tumor y su entorno. Este último enfoque de la "semilla y el suelo", en particular, cuya formulación se remonta un siglo atrás por Stephen Paget, es hoy uno de los que más atracción suscita.

Abundan en la ciencia objetos, fenómenos y procesos cuya existencia se conoce desde hace mucho tiempo pero cuya naturaleza o función sigue hoy envuelta en el misterio. La citología nos muestra un ejemplo con el centrosoma. Sabíamos que la misión principal de ese orgánulo consistía en regular la nucleación de los microtúbulos. Parece ahora que es el verdadero organizador de los principales procesos citoplasmáticos, según se ha demostrado en experimentos, acometidos en *Drosophila*, mediante el uso de afidicolina, un inhibidor de la síntesis de ADN.

El biblingüe perfecto no existe, afirman los últimos trabajos en psicolingüística. En cualquier idioma, el habla es un continuum en que los emisores aportan pocas claves sobre los límites de las palabras, frases u otras unidades significativas. Para entender el mensaje, el receptor debe partir el flujo continuo del habla en segmentos que correspondan a tales unidades. Ahora bien, la segmentación es peculiar de cada lenguaje. El español o el francés suelen ser precisos en el fraccionamiento silábico, lo que no ocurre con el inglés. Todos tenemos una lengua básica o dominante que suele ser determinante en el procesamiento del mensaje escuchado.

Que existen los cuasicristales parece fuera de toda duda, desde que hará un lustro se observó que las aleaciones de manganeso y aluminio cristalizaban con simetría quíntuple. Esas redes cristalinas son incompatibles con la simetría de traslación de cristales infinitos. Mas, ¿por qué existen los cuasicristales? Los físicos de estado sólido habían llegado a un punto muerto: no se veía por ninguna parte qué ventaja energética resultaba de la estabilidad de ese sistema. La imaginación de otros podría haber encontrado la causa: los cuasicristales se dan por la gran entropía que los caracteriza.

Las implicaciones éticas, sociales y legales del SIDA son obvias. De estas últimas constituye una prueba la indemnización que ha de abonar, a partir de este mes de septiembre, el gobierno francés a los hemofílicos que recibieron una transfusión de sangre contaminada con el virus. Cuando comenzó a entrar en vigor la ley que obligaba el análisis sistemático de los hemoderivados, el primero de agosto de 1985, casi la mitad de los hemofílicos franceses habían recibido ya sangre contaminada. De ellos, 200 han desarrollado el SIDA y 80 ha muerto.